**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**
**DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

# *PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN ZONAS PECUARIAS DE VENEZUELA A TRAVÉS DEL PROGRAMA BIODIGESTOR©.*

**Profesora Guía:**
María Mago

**Autores:**
Flores G. Blanca M
Tovar Luis A.

Valencia, Mayo de 2010.

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**
**DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

# *PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN ZONAS PECUARIAS DE VENEZUELA A TRAVÉS DEL PROGRAMA BIODIGESTOR©.*

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

**Profesora Guía:**

María Mago

**Autores:**

Flores G. Blanca M

Tovar Luis A.

Valencia, Mayo de 2010.

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**
**FACULTAD DE INGENIERIA**
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA**
**DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

# APROBACIÓN

Considero que el Trabajo de Grado titulado

***"Propuesta de diseño de una planta de biogás para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela a través del programa biodigestor©."***

Elaborado por los bachilleres:

| | |
|---|---|
| ***Blanca M. Flores G.*** | ***Luis A. Tovar*** |
| ***C.I: 15.811.630*** | ***C.I:15.046.921*** |

Para optar al título de

***INGENIERO ELECTRICISTA***

Reúne los requisitos exigidos por la Escuela de *Ingeniería Eléctrica* de la Universidad de Carabobo, y tiene méritos suficientes como para ser sometido a la presentación y evaluación exhaustiva por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Valencia, a los 17 días del mes de Mayo del 2010.

| | | |
|---|---|---|
| Ing. María Mago | Ing. Rubén Terán | Ing. Verner Hornebo |

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**
**FACULTAD DE INGENIERIA**
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA**
**DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

# ACTA DE VEREDICTO

Nosotros, los abajo firmantes, constituidos como jurado examinador y reunidos en Valencia, el día (21-05-2010), con el propósito de evaluar el Trabajo de Grado Titulado:

***"Propuesta de diseño de una planta de biogás para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela a través del programa biodigestor©."***

Elaborado por los bachilleres:

| | |
|---|---|
| ***Blanca M. Flores G.*** | ***Luis A. Tovar*** |
| ***C.I: 15.811.630*** | ***C.I:15046921*** |

Emitimos el siguiente veredicto:

Reprobado __ Aprobado __ Notable __ Sobresaliente __

Observaciones:

_____
_

_____
_

_____ _____ _____ _____

_____ _____ _____
Ing. María Mago Ing. Rubén Terán Ing. Verner Hornebo

# *DEDICATORIA*

*Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño.*

*A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa*

*A mi madre Luisa Tovar, pilar fundamental de mi formación, que para mí constituye ejemplo de vida, por enseñarme a creer en mí y que para lograr las metas es necesario luchar, perseverar y no darse nunca por vencido. Gracias por estar siempre a mi lado y brindarme tu amor incondicional.*

*A los que nunca dudaron que lograría este triunfo: mis hermanas Gloria y Marlene, mi abuela Carmen y mi abuelito Pedro, que dios lo tenga en su gloria.*

*A todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible la realización de este sueño de ser Ingeniero Electricista de la Universidad de Carabobo.*

*Luis A. Tovar*

# *DEDICATORIA*

*A Dios y la Virgen María, por permitirme estudiar la carrera de Ingeniería Eléctrica y darme la sabiduría y ciencia necesaria para la realización de este trabajo de grado.*

*A mis padres, Ing. Juan Flores e Ing. Anecia González, por darme todo su apoyo y todo su amor, cada uno de mis días.*

*A mi hermano Juan Flores, por darme todo su apoyo, amor, cariño respeto; a ti la mayor parte de este trabajo de investigación.*

*A toda mi familia y amigos que de alguna manera contribuyeron en la realización de este trabajo de grado. Por sus oraciones y sus buenos deseos.*

*Blanca M. Flores G*

## AGRADECIMIENTOS

*Realizar esta investigación requirió un gran esfuerzo de nuestra parte, sin embargo no hubiese podido materializarse sin el apoyo de muchas otras personas. Quisiéramos ante todo dar gracias a Dios, por darnos vida, salud e iluminar nuestro camino. Gracias a la profesora María Mago por brindarnos la oportunidad de desarrollar un tema de investigación de esta envergadura, apoyándonos no solo como tutor sino como una amiga. Gracias al profesor Alfonso Urenza por toda la ayuda desinteresada que proporcionó en los momentos más precisos. Gracias a nuestros apreciados Amigos, con quienes compartimos momentos de alegrías, tristezas, angustias y felicidad a lo largo de todos estos años de carrera, y que permanecerán en nuestras memorias a pesar del tiempo y la distancia. Gracias a nuestras familias por darnos el apoyo moral para continuar hasta el final.*

*A todos aquellos que, de una forma u otra, aportaron su granito de arena para la consolidación de este proyecto.*

*A todos mil gracias…*

*Luis A. Tovar*

*Blanca M. Flores*

# RESUMEN

***PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN ZONAS PECUARIAS DE VENEZUELA A TRAVÉS DEL PROGRAMA BIODIGESTOR©.***

***Luis Alberto Tovar***
***Universidad de Carabobo***
***thowher@hotmail.com***

***Blanca M. Flores***
***Universidad de Carabobo***
***bm.blanca@gmail.com***

La digestión anaeróbica a través de biodigestores se presenta en la actualidad como una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos agropecuarios, ya que además de disminuir la carga de contaminantes generadas por éstos, tiene la virtud de generar un gas con importante poder calorífico (biogas), susceptible al aprovechamiento energético en sistemas electrógenos para la generación de energía eléctrica y térmica fácilmente utilizable. Por tal motivo surge la inquietud de llevar a cabo la presente investigación: ***"Propuesta de diseño de una planta de biogás para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela a través del programa Biodigestor©"***. La metodología empleada se basó en un análisis detallado de los desechos agropecuarios, considerados como material de carga para la producción de biogás; en este punto se estudian las características que definen la biomasa y la cantidad de biogás producido a partir de tales desechos, para posteriormente evaluar los diferentes tipos de biodigestores existentes en el mercado, así como los parámetros y/o criterios a considerar para su diseño y el de las diferentes estructuras auxiliares que conforman la planta de generación de biogás, mediante el uso del software profesional de diseño BioDigestor©. También se dimensionó y seleccionó el sistema electrógeno de acuerdo a la estimación de la producción diaria de biogas, y por último se realizó una modelación de este sistema a través del software MATLAB®, para simular el funcionamiento del motorgenerador y comprobar la capacidad de producción de energía eléctrica de la planta de biogás.

***Palabras clave*****:** *Biomasa, Biogás, Digestión anaeróbica, Desechos agropecuarios, Biodigestor, BioDigestor©, MATLAB®, Sistema Electrógeno, Generación de potencia.*

# INDICE GENERAL


Dedicatoria ..... i
Agradecimientos ..... iii
Resumen ..... iv
Indice general ..... v
Índice de figuras ..... xi
Índice de tablas ..... xvi
Introducción ..... 1
Abreviaturas ..... 3
Capitulo I ..... 5
1.1. Planteamiento del problema ..... 5
1.2. Objetivos ..... 8
1.2.1. Objetivo general ..... 8
1.2.2. Objetivos específicos ..... 8
1.3. Justificación ..... 9
1.4. Alcance y delimitaciones ..... 10
1.5. Recursos ..... 11
Capitulo II ..... 12
2.1. Antecedentes de la investigación ..... 12
2.1.1. Antecedentes nacionales. ..... 12
2.1.2. Antecedentes internacionales ..... 14
2.2. Bases teóricas. ..... 16
2.2.1. Generalidades ..... 16
2.3. La Biomasa ..... 18
2.3.1. Tipos de Biomasas ..... 19
2.3.1.1. Biomasa Natural ..... 19
2.3.1.2. Biomasa Residuall ..... 19

2.3.1.1. Biomasa Producida ..... 20
2.3.2. Fuentes de extracción ..... 20
2.3.2.1. Bosques ..... 20
2.3.2.2. Residuos Agricolas ..... 21
2.3.2.3. Residuos Ganaderos ..... 21
2.3.2.4. Residuos Agroindustriales ..... 22
2.4. Proceso de Conversion de la Biomasa ..... 22
2.4.1. Metodos Termoquimicos ..... 23
2.4.1.1. Combustion Directa ..... 23
2.4.1.2. La Pirolisis ..... 24
2.4.1.3 Gasificacion ..... 25
2.4.2. Metodos Biologicos ..... 26
2.4.2.1. La Fermentación Alcohólica ..... 26
2.4.2.2. Digestión Anaerobia ..... 27
2.5. Biogas. ..... 27
2.6. Descripcion del Proceso de Digestión Anaerobica . ..... 28
2.6.1. Hidrólosis ..... 30
2.6.2. Acidogénesis ..... 30
2.6.3. Acetogénesis ..... 31
2.6.4. Metanogénesis ..... 32
2.7. Factores Ambientales y operativos que deben controlarse en D.A . ..... 32
2.7.1. Concentración de la Carga al Biodigestor ..... 32
2.7.2. Medición del pH ..... 33
2.7.3. Temperatura ..... 33
2.7.4. Agitación ..... 33
2.8. Parte de una Planta de Biogas. ..... 34
2.8.1. Tanque de Alimentación ..... 34
2.8.2. Sistema de Alimentación ..... 34

2.8.3. Digestor de Alimentación ..... 35
2.8.3.1. Digestores de Carga en Batch ..... 35
2.8.3.2. Horizontales o de desplazamiento ..... 36
2.8.3.2.1. Digestores de Régimen Semicontinuo ..... 36
2.8.3.2.2. Digestores de Régimen Continuo ..... 36
2.8.3.3. Complementos Mezclados (CSTR) ..... 37
2.8.3.4. Digestores de Dos Etapas ..... 38
2.8.3.5. Digestion Seca ..... 38
2.8.4. Lecho de Secado ..... 39
2.8.5. Tuberia de Captacion y Conducción de Biogas ..... 39
2.8.6. Sistema de Purificación del Biogás ..... 39
2.8.6.1. Drenaje ..... 40
2.8.6.2. Eliminación del CO2 ..... 40
2.8.6.3. Eliminación del H2S ..... 41
2.8.7. Tanque de Alimentación de Biogás ..... 41
2.8.8. Sistema de Generacion de Energia Electrica o Calorica ..... 42
2.9. Proceso de funcionamiento de una Planta de Biogas. ..... 42
2.10. Produccion de energia electrica . ..... 43
2.11. Motores de combustión interna . ..... 44
2.11.1. Componentes de un M.C.I de encendido por chispa ..... 44
2.11.2. Terminología utilizada en el estudio de los M.C.I ..... 46
2.11.3. Funcionamiento de los M.C.I de cuatro tiempos ..... 47
2.11.4. Ciclo Otto teórico para motores de cuatro tiempos ..... 48
2.11.5. Leyes que rigen el funcionamiento del ciclo otto en un M.C.I ..... 49
2.11.6. Ciclo Otto de cuatro tiempos para un M.C.I ..... 51
2.11.7. Consideraciones de un motor real ..... 54
2.12. El generador eléctrico . ..... 56
2.13. Máquina sincrona funcionando como generador electrico . ..... 58

2.13.1. Aspectos constructivos de la maquina sincronica ..... 60
2.13.2. El modelo eléctrico de la máquina sincronica ..... 62
Glosario de terminos ..... 65
Capitulo III ..... 70
3.1. Clasificacion de la investigacion ..... 70
3.2. Descripcion de las fases metodologicas ..... 71
3.3. Unidad de estudio y analisis ..... 75
3.4. Tecnicas de recolección, interpretacion y presentacion de la información ..... 77
3.4.1. Instrumento de recolección de datos. ..... 76
3.5. Técnicas de análisis de datos. ..... 77
3.5.1. Análisis e interpretación de datos ..... 78
3.5.2. Presentación de la información ..... 78
Capitulo IV ..... 80
Analisis e interpretación de los datos ..... 80
Desarrollo de las fases metodologicas ..... 80
4.1 Estudiar el potencial de biomasa para la producción del biogás. ..... 80
4.1.1. Conceptualizar los análisis físico-químicos que deben realizarse a la biomasa que se está considerando como material de carga, a fin de evaluar su potencial para producir biogás ..... 80
4.1.2. Analizar los diferentes tipos de desechos agropecuarias, considerados como material de carga o sustrato; a fin de evaluar la cantidad de biogás que producen considerando las pruebas físico-químicas antes mencionados**.** ..... 89
4.1.3. Evaluar la calidad del biogás producido. ..... 94
4.2 Evaluar diferentes tipos de biodigestores existentes en el mercado, así como parámetros a considerar para establecer los criterios de diseño. ..... 97
4.2.1. Conceptualizar el biodigestor, definiendo su estructura y su clasificación..... 97
4.2.2. Establecer los mecanismos de operación del biodigestor. ..... 98
4.2.3. Establecer los tipos de biodigestores existentes en el mercado. ..... 99

4.3 Dimensionar la planta de biogas y sus estructuras ..... 104
4.3.1. Establecer las dimensiones de las estructuras que conforman la planta de generación de potencia a través del aprovechamiento de la biomasa disponible. A continuación se establecen las estructuras a ser dimensionadas. ..... 104
4.4 Diseñar la planta de generación de potencia a través del sotware Biodigestor©, a fin de caracterizar el dimensionamiento de la planta. ..... 141
4.4.1 Instalación efectiva del software ..... 141
4.4.2 Construcción del modelo de la planta de generación de potencia. ..... 142
4.4.3 Una vez construido el modelo en el software, se procederá a introducir y/o ajustar los parámetros seleccionados, correspondientes a la planta. ..... 142
4.4.4 Obtención de resultados. en el caso particular de esta investigación, la información extraída de la simulación es la siguiente. ..... 153
4.5 Dimensionar y seleccionar el generador de potencia electrica. ..... 164
4.5.1. Estimar la producción de biogás. ..... 164
4.5.2. Establecer el porcentaje de gas metano contenido en el biogás. ..... 165
4.5.3. Establecer la cantidad de gas metano producido por día. ..... 166
4.5.4. Determinar la eficiencia de producción de energía eléctrica del sistema motor-generador. ..... 167
4.5.5. Cálculo de la potencia del sistema motor-generador a instalar. ..... 167
4.5.6. Selección del sistema motogenerador a instalar. ..... 170
4.6 Simular utilizando matlab®-simulink, el sistema motor generador con caracteristicas similares al seleccionado en la fase V, a fin de caracterizar su comportamiento eléctrico. ... 171
4.6.1 Construcción del modelo matemático del motor de ciclo otto. ..... 171
4.6.2 Modelo de la maquina sincrónica funcionando como generador en el lenguaje matlab® simulink ..... 186
4.6.3 Una vez construido el modelo en el software matlab®simulink, se procederá a introducir y/o ajustar los parámetros correspondientes del motor y el generador. ..... 190

4.6.4 Obtención de resultados. en el caso particular de esta investigación, la información que se extrae de la simulación es la siguiente. ..... 196
4.7 Seleccionar los equipos que componen la planta de biogas. ..... 203
4.7.1 Selección de los equipos que forman parte de las estructuras dimensionadas en la fase III, los cuales se mencionan a continuación. ..... 203
4.7.1.1. Agitadores del tanque de biodigestion ..... 203
4.7.1.2. Mezclador del tanque de alimentación ..... 208
4.7.1.3. Tuberias de alimentacion y descarga de la planta de biogas ..... 213
4.7.1.4. Filtros de limpieza biogas biolimp siloxa ..... 218
4.7.1.5. Gasometro ..... 223
4.7.1.6. Bomba de descarga de biol ..... 226
4.7.1.7. Bomba de descarga de lodos ..... 232
Capitulo V ..... 236
Conclusiones y recomendaciones. ..... 236
5.1 Conclusiones. ..... 236
5.2 Recomendaciones. ..... 239
Referencias ..... 241
Anexos ..... 247
Anexos de la planta de biogas ..... 247
Anexo 1: Diseño de la planta de biogas ..... 248
Anexo 2: Linea de producción de biabono ..... 249
Anexo 3: Linea de producción de biol ..... 250
Anexo 4: Linea de producción de biogas ..... 251
Anexo 5: Corte transversal - sistema de alimentación y descarga ..... 252
Anexo 6: Corte longitudinal - sistema de alimentación y descarga ..... 253
Anexo 7: Corte trasversal - sistema de captación de biogas ..... 254
Anexo 8: Corte longitudinal - sistema de captación de biogas ..... 255
Anexo 9: Corte longitudinal - sistema de descarga de lodos ..... 256

Anexo 10: Corte longitudinal - sistema de agitación de la biomasa ..... 257
Anexos del motogenerador ..... 258
Anexo 11: Motogenerador Caterpillar G3406 ..... 259
Anexo 12: Placa de presentación del motogenerador Caterpillar G3406 ..... 259
Anexo 13: Datos técnicos del Motogenerador Caterpillar G3406 ..... 260
Anexo 14: Especificaciones Técnicas del Generador CAT SR4B ..... 261
Anexo 15: Especificaciones Técnicas del Motor CAT G3406 ..... 261
Anexo 16: Especificaciones Técnicas del Panel de Control CAT ..... 261
Anexo 17: Equipos instalados con el Motogenerador y equipos opcionales ..... 262
Anexo 18: Dimensiones del Motogenerador CAT SR4B ..... 262
Apendices ..... 263
Apendice 1: Propiedades físicas del agua ..... 264
Apendice 2: Tensión del vapor y peso específico del agua según temperaturas ..... 265
Apendice 3: Presión atmosferica en función de la altitud sobre el nivel del mar ..... 265

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Alejandro Volta [16]. ..... 16
Figura 2.2. Amedeo Avogadro [16]..... 17
Figura 2.3. Biomasa Natural [18] ..... 19
Figura 2.4. Biomasa Residual [18]. ..... 19
Figura 2.5. Bosques [19]. ..... 20
Figura 2.6. Restos de cultivos de la caña de azúcar [19]. ..... 21
Figura 2.7. Purines de ganado vacuno [19]. ..... 21
Figura 2.8. Derivados de los procesos industriales [19]. ..... 22
Figura 2.9. Conversión Energética de la Biomasa [8] ..... 22
Figura 2.10. Esquema de planta de biogás por combustión directa [7]. ..... 24
Figura 2.11. Proceso de gasificación para la generación eléctrica [7]. ..... 25
Figura 2.12. Ciclo Anaeróbico [15]. ..... 29
Figura 2.13. Esquema simplificado proceso anaeróbico [14]. ..... 31
Figura 2.14. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. ..... 43
Figura 2.15. Motor de Combustión Interna. ..... 44
Figura 2.16. Ciclo Teórico de Otto. ..... 48
Figura 2.17. Fase Admisión. ..... 52
Figura 2.18. Fase Compresión. ..... 53
Figura 2.19. Fase Potencia. ..... 53
Figura 2.20. Fase Escape. ..... 54
Figura 2.21. Efecto de la relación de mezcla y las condiciones T3 y P3. ..... 55
Figura 2.22. Efecto de la relación de mezcla sobre la condición T4. ..... 56
Figura 2.23. Curva de Eficiencia del Generador FG Wilson. ..... 58
Figura 2.24. Máquina síncrona de baja potencia con el inducido en el rotor. ..... 61
Figura 2.25. Tipos constructivos de máquinas síncronas. ..... 61
Figura 2.26. Circuitos equivalentes de secuencia cero para los ejes q y d de M.S. ..... 63

Figura 4.27. Flujo-grama para dimensionar digestores. ..... 106
Figura 4.28. Diagrama del proceso de biofiltración exterior. ..... 114
Figura 4.29. Proceso de biofiltración con alimentación externa de nutrientes y humedad. . 119
Figura 4.30. Diagrama del proceso de biofiltración de un filtro biolavador. ..... 119
Figura 4.31. Formato de filtros en serie o paralelo. ..... 128
Figura 4.32. Alternativa de filtro de limaduras de hierro. ..... 136
Figura 4.33. Datos del proyecto y fuentes de biomasa. ..... 147
Figura 4.34. Ingreso de datos por tipo de animal. ..... 148
Figura 4.35. Resumen de disponibilidad de biomasa. ..... 149
Figura 4.36. Resultados del dimensionamiento del biodigestor. ..... 150
Figura 4.37. Porcentajes – eficiencia de degradación. ..... 150
Figura 4.38. Calculo de la producción de biogás y energía. ..... 151
Figura 4.39. Geometría, diseño e implementación del biodigestor. ..... 152
Figura 4.40. Propuesta de implantación de biodigestores y estructuras auxiliares. ..... 153
Figura 4.41. Línea de producción de bioabono. ..... 155
Figura 4.42. Línea de descarga del biol. ..... 156
Figura 4.43. Línea producción de Biogás. ..... 157
Figura 4.44. Corte transversal del biodigestor - sistema de alimentación y descarga. ..... 158
Figura 4.45. Corte longitudinal del biodigestor - Sistema de alimentación y descarga. ..... 158
Figura 4.46. Corte longitudinal del biodigestor - sistema agitación (B-B). ..... 159
Figura: 4.47. Corte longitudinal del biodigestor - sistema descarga de lodos (B-B). ..... 160
Figura 4.48. Corte transversal del biodigestor - sistema de captación de biogás. ..... 160
Figura 4.49. Corte longitudinal del biodigestor-sistema captación de biogás. ..... 161
Figura 4.50. Rendimiento volumétrico en el ciclo Otto ..... 173
Figura 4.51. Bloque de componentes de la mezcla aire-metano ..... 174
Figura 4.52. Bloque constante nR ..... 175
Figura 4.53. Bloque de Temperatura Post-compresión ..... 176
Figura 4.54. Grafica rendimiento del combustible Vs velocidad ..... 177

Figura: 4.55. Bloque de Aporte Calorífico ..... 178
Figura: 4.56. Calculo de la temperatura T3 ..... 178
Figura 4.57. Bloque Trabajo Compresión ..... 181
Figura 4.58. Bloque Trabajo Expansión ..... 183
Figura 4.59. Calculo de potencia mecánica ..... 184
Figura 4.60. Diagrama de bloques del motor de combustion interna ..... 186
Figura 4.61. Librería de matlab® simulink- maquina sincrónica ..... 187
Figura 4.62. Librería de matlab® simulink- maquina sincrónica ..... 188
Figura 4.63. Estructura interna del modelo motor-generador ..... 189
Figura 4.64. Parámetros del Motor ..... 190
Figura 4.65. Menú configuración del generador ..... 192
Figura 4.66. Menú parámetros del generador ..... 194
Figura 4.67. Menú parámetros del generador ..... 195
Figura 4.68. Menú parámetros del generador-advanced ..... 197
Figura 4.69. Grafica de la corriente de línea Ia ..... 198
Figura 4.70. Grafica de la corriente de línea Ia RMS ..... 198
Figura 4.71. Grafica de la corriente de línea Ia, Ib, Ic ..... 199
Figura 4.72. Grafica de la tensión de línea Va ..... 199
Figura 4.73. Grafica de la tensión de línea Va, Vb, Vc ..... 200
Figura 4.74. Grafica de la tensión de fase Va ..... 200
Figura 4.75. Grafica del numero de vueltas de la maquina en RPM ..... 201
Figura 4.76. Grafica del Factor de potencia de la maquina sincrónica ..... 201
Figura 4.77. Grafica de la potencia activa (KW) ..... 202
Figura 4.78. Grafica del torque eléctrico (N.m) ..... 202
Figura 4.79. Curva de Potencia Vs Volumen para la selección de Agitadores Industriales ..... 204
Figura 4.80. Agitador industrial ABS-SCABA serie SVVPT ..... 205
Figura 4.81. Motoreductor ABS SCABA-CMGV ..... 207
Figura 4.82. Impulsor ABS SCABA-SHP17 ..... 207

Figura 4.83. Curva de selección de Aplicación para los Agitadores Grundfos ..... 209
Figura 4.84. Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos ..... 210
Figura 4.85. Denotación de los parámetros del Agitador Grunfos ..... 211
Figura 4.86. Características Eléctricas del Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos ..... 211
Figura 4.87. Dimensiones del Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos ..... 211
Figura 4.88. Características constructivas del Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos ..... 212
Figura 4.89. Diámetro de tuberías PVC según COVENIN ..... 214
Figura 4.90. Válvulas de bola para tuberías PVC de 2" ..... 215
Figura 4.91. Manómetro Modelo 8170 ..... 216
Figura 4.92. Sensor de temperatura tipo termocupla ..... 216
Figura 4.93. Sensor de presión 1 PSI-G-4V marca AllSensors ..... 217
Figura 4.94. Trampa de llama 8450 marca Groth ..... 217
Figura 4.95. Quemador de exceso de gas 8391B marca Groth ..... 218
Figura 4.96. Modulo de limpieza de Biogás Biolimp-Siloxa ..... 219
Figura 4.97. Filtros Biolimp-Siloxa ..... 222
Figura 4.98. Vista isométrica de los filtros Biolimp-Siloxa ..... 222
Figura 4.99. Vista de planta de los filtros Biolimp-Siloxa ..... 223
Figura 4.100. Vista esquemática de los Gasómetros SATTLER ..... 225
Figura 4.101. Gasómetros SATTLER ..... 226
Figura 4.102. Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 229
Figura 4.103. Graficas de interés de Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 230
Figura 4.104. Dimensiones de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 231
Figura 4.105. Bomba Flyght 3068 ..... 234
Figura 4.106. Características Hidroeléctricas de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 234
Figura 4.107. Características Constructivas de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 235
Figura 4.108. Instalación típica de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 235

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Composición promedio de biogás ..... 28
Tabla 4.1. Producción de biogás y nutrientes - Valores referenciales ..... 90
Tabla 4.2. Producción de biogás - excremento de animales ..... 90
Tabla 4.3. producción anual de estiércol (kg/PVA.a) y % de MS-MV y N ..... 91
Tabla 4.4. Producción anual (kg/pva.a) y porcentajes ..... 91
Tabla 4.5. Producción de estiércol y Biogás por animal ..... 91
Tabla 4.6. Características físico químicas de excrementos ..... 92
Tabla 4.7. Características físico químicas promedio de estiércol de animales ..... 92
Tabla 4.8. Producción de estiércol y biogás para diferentes tipos de animal en base al peso 93
Tabla 4.9. Contenido de metales pesados ..... 94
Tabla 4.10. Composición del biogás ..... 95
Tabla 4.11. equivalencias energéticas 1 m3 de biogás ..... 95
Tabla 4.13 Características de biogás y comparación con otros gases ..... 96
Tabla 4.14. Características de los carbonos activados ..... 127
Tabla 4.15. Numero de fincas inventariadas en el estado Guárico ..... 143
Tabla 4.16. Numero de fincas inventariadas en el Municipio Ribas ..... 143
Tabla 4.17. Dimensiones del Tanque de Alimentación ..... 154
Tabla 4.18. Dimensiones del Biodigestores ..... 154
Tabla 4. 19. Datos Hidráulicos Biodigestor ..... 154
Tabla 4.20. Lecho de secado ..... 155
Tabla 4.21. Tanque de descarga ..... 156
Tabla 4.22. Producción de biogás y energía ..... 162
Tabla 4.23. Equivalencias CO2 ..... 162
Tabla 4.24. Producción específica biogás (Nm3) ..... 162
Tabla 4.25. Producción especifica CH4 (Nm3) ..... 163
Tabla 4.26. Equivalencias energéticas biogás ..... 163

Tabla 4.27. Producción de fertilizante orgánico ..... 163
Tabla 4.28. Caracteristicas electricas del motorgenerador ..... 169
Tabla 4.29. Ingreso de datos en el motor de combustión interna ..... 191
Tabla 4.30. Ingreso de datos en el menú configuración de la maquina sincrónica ..... 193
Tabla 4.31. Ingreso de datos en el menú parámetros de la maquina sincrónica ..... 196
Tabla 4.32. Selección de Agitadores ..... 205
Tabla 4.33. Características técnicas del agitador ABS-SCABA serie SVVPT ..... 206
Tabla 4.34. Agitadores Grunfos ..... 210
Tabla 4.35 Especificaciones de diámetro de tuberías ..... 214
Tabla 4.36 Selección de Gasómetros SATTLER ..... 224
Tabla 4.37 Características Hidroeléctricas de la Bomba ..... 228
Tabla 4.38 Características Hidroeléctricas de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex ..... 230

# INTRODUCCIÓN

La energía; es un bien que se considera publico porque su existencia y/o aprovechamiento tiene un beneficio para la totalidad de la Nación, ya sea en el presente o en el futuro; es de orden público, como el ambiente, los recursos naturales y la economía; en ese sentido las políticas públicas relativas a la energía deben ser entendidas como acciones llevadas a cabo por la autoridad (Gobierno Nacional, Regional o Local), deben favorecer el bienestar de la sociedad, y por ende se justifican y son de gran importancia y valor por que cuidan los bienes a nombre de la Comunidad.

El presente trabajo de grado esta enfocado en la generación de potencia a través de energías alternativas, cuyo propósito consiste en una propuesta de diseño de una planta de generación a través del uso del biogás. El desarrollo del presente trabajo de investigación se presenta en cinco capítulos que comprenden los siguientes aspectos:

En el capítulo I se muestran las interrogantes que han sido respondidas a lo largo de la presente investigación, por ejemplo: ¿Por qué surge el desarrollo de esta propuesta?, ¿Para qué llevar a cabo su desarrollo?, ¿Cuáles serán los beneficios y aportes? y ¿En cuánto tiempo se lograra dichas metas?. En otras palabras, el planteamiento del problema, la justificación, el objetivo general y los objetivos específicos que dan respuesta a los planteamientos antes mencionados.

En el capítulo II se indican las bases teóricas que dan el aval y claridad a las variables anteriores, se emprende el proyecto de investigación, enfocándolo hacia la plataforma científica y tecnológica en la cual está basada, justificando el desarrollo de la idea desde el estado del arte, concebida ahora como trabajo de investigación.

Posteriormente, en el capítulo III se establecen las fases metodológicas, los procedimientos normas y características de la investigación; se presentan los mecanismos de cómo se llevara a cabo la recopilación de datos y la información necesaria. Se muestra cómo se irá generando y organizando la información.

Luego en el capítulo IV, se lleva a cabo el desarrollo de la investigación utilizando elementos de índole internacional como: muestras físico químicas de excretas de ganados; evaluación de diferentes tipos de biodigestores. Criterios que abrirán el camino para el dimensionamiento de la planta de biogás, adaptado a los recursos biomasicos, con los que cuenta la zona en la cual se delimito el estudio. En esta parte se utilizara el programa Biodigestor© para simular la estructura de la planta requerida para tal fin.

Finalmente en el capitulo V, se presentan las conclusiones y recomendaciones, que surgieron del desarrollo del presente trabajo de investigación, permitiendo la creación de una propuesta de alto valor social y técnico para el desarrollo energético del país.

## *ABREVIATURAS*

| | |
|---|---|
| **BG** | Producción de Biogás |
| **BHP** | British Horse Power |
| **BPM** | Bacterias Productoras de Metano |
| **BRS** | Bacterias Reductoras de Sulfato |
| **C** | Carbono |
| **C:N** | Relación Carbono – Nitrógeno |
| **CAL** | Caloría |
| $\boldsymbol{CH_4}$ | Gas Metano |
| **CHV** | Carga Hidráulica volumétrica |
| **Cl** | Carga de Lodos |
| $\boldsymbol{CO_2}$ | Dióxido de carbón |
| **COV** | Carga Orgánica Volumétrica |
| **DQO** | Demanda Química de Oxigeno |
| **DBO** | Demanda Bioquímica de Oxígeno |
| **EJ** | Exajulios |
| **FeO** | Monóxido de hierro |
| **H** | Hidrógeno |
| **O** | Agua |
| $\boldsymbol{H_2}$**S** | Sulfuro de Hidrógeno |
| **K** | Potasio |
| **k** | Coeficiente de degradación de la materia |
| $\boldsymbol{k_e}$ | Factor de Equivalencia |
| $\boldsymbol{K_2}$**O** | Oxido de Potasio |
| **kg** | Kilogramos |
| **kg/**$\boldsymbol{m_3}$**.d** | Kilogramo por metro cúbico por día |
| **kgMv/**$\boldsymbol{m_3}$ | Kilogramo de masa volátil por metro cúbico |
| **kw** | Kilovatio |

| | |
|---|---|
| **kWh** | Kilovatios por hora |
| **$m_3$** | Metros Cúbicos |
| **$m_3$/d** | Metro cúbico por día |
| **$m_3$/kg** | Metro cúbico por kilogramo |
| **$m_3$/m3*d** | Metro cúbico por metro cúbico por día |
| **$m_3$/t** | Metros cúbicos por toneladas |
| **$m_3$/t MH** | Metros Cúbicos por Toneladas Masa Húmeda |
| **$m_3$/t*** | Metros cúbicos por toneladas |
| **mg** | Miligramos |
| **mg/l** | miligramos por litro |
| **MJ** | Mega Joule |
| **MS** | Masa Seca |
| **MV** | Masa Volátil |
| **Mw** | Megavatios |
| **N** | Nitrógeno |
| **$O_2$** | Oxígeno |
| **Pa** | Pascal |
| **pH** | Acidez |
| **ppm** | Parte por millón |
| **RPM** | Revoluciones por minuto |
| **S** | Azufre |
| **ST** | Sólidos Totales |
| **t/$m_3$** | Tonelada por metro cúbico |
| **TBG** | Tasa de Producción de Biogás |
| **TºC** | Temperatura en grados centígrados |
| **TPN** | Temperatura y presión normal |
| **TRD** | Tiempo de Retención Días |
| **TRH** | Tiempo de Retención Hidráulica |

# CAPITULO I

# FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A raíz de la crisis petrolera de los años 70 se empezó a tomar conciencia por parte del conjunto de la sociedad de la enorme trascendencia que tenía el abastecimiento energético en los modos de vida. En respuesta a este fenómeno, hubo un movimiento que consideró que las energías renovables podían ser una alternativa energética que permitiese alcanzar un mayor grado de independencia de los recursos petrolíferos, [1].

De esta forma, hoy en día los ciudadanos están tomando conciencia de los graves problemas derivados del uso insostenible de la energía, y a un modelo de concentración, basado en el petróleo y en los combustibles fósiles como fuentes de energía baratas y casi inagotables, se le contrapone, cada vez más, un nuevo modelo energético que parte de las siguientes premisas: la diversificación en las fuentes, la eficiencia, el ahorro en el consumo y el respeto al medio ambiente, [1].

Estos aspectos, y especialmente el último, han tomado gran relevancia con los estudios sobre el ozono y el cambio climático global, plasmándose en los objetivos de reducción de emisiones de $CO_2$ que muchos países han ido asumiendo tras la Cumbre de el Protocolo de Kyoto. Sin embargo, y a pesar de ello, como afirmo el Premio Nobel de Física Carlo Rubia, en su libro "El futuro de la energía", tanto el protocolo de Kyoto como el resto de medidas políticas, se muestran insuficientes a largo plazo, siendo necesario realizar importantes esfuerzos tecnológicos y económicos para la implementación de nuevos modelos de generación de potencia basados en energías alternativas, [2].

La energía solar, la energía geotérmica, la energía eólica, la energía mareomotriz, la energía de la biomasa, son ejemplos de algunas formas de energía alternativa que el hombre ha venido desarrollando estos últimos años para tratar de paliar la grave crisis energética en que se encuentra el mundo y reducir la cantidad de gases que se sueltan diariamente a la atmosfera destruyendo la capa de ozono, [3].

En Venezuela se han venido desarrollando unas series de proyectos de generación de potencia basados en energía eólica y energía solar, en lugares remotamente alejados donde no se cuenta con un suministro eficiente de energía eléctrica y los mismos cuentan con un gran potencial para la implementación de este tipo de energía. Pero existe otro tipo de energía alternativa, con la que Venezuela cuenta con un gran potencial y la cual hasta ahora no sido aprovechada, y es la aplicación de la energía de la biomasa para la obtención de energía eléctrica de forma indirecta, [4].

Estados como Zulia, Barinas, Apure y Guárico; cuentan con un gran potencial de biomasa en sus desechos agropecuarios. Para el año 2006, el estado Guárico poseía la cantidad de 12.000.000 de cabezas de ganado bovino y para el año 2007 según datos suministrados por la federación venezolana de porcicultura (FEPORCINA) hubo una producción total de 2.300.000, unidad animal tipo porcino. Los residuos de estas unidades animales, generalmente se eliminan sin un tratamiento previo; por lo que se convierten en agentes contaminantes de considerable alcance, afectando el ecosistema, alterando el equilibrio ecológico y la calidad de vida, [6], [7].

Para solucionar este problema, los desechos agropecuarios pueden ser depositados en un contenedor cerrado, impermeable y herméticamente sellado (biodigestor), en una dilución de agua para que se descompongan, produciendo gas metano y fertilizante orgánico rico en nitrógeno, fosforo y potasio, [8].

Este fenómeno se llama biodigestion y ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal, que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen animal que se encuentran dentro del biodigestor, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH4), llamada biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible en generadores de energía eléctrica, [8].

Los biodigestores son parte fundamental dentro de una planta de biogás, ya que allí se produce la mezcla de agua y desechos orgánicos para la producción del gas, es por esto que su dimensionamiento tiene que ser muy cuidadoso a la hora del diseño del mismo, [7].

El programa biodigestor© es un software desarrollado para el diseño y dimensionamiento de biodigestores, tanto domestico como industriales, por lo que el uso de esta herramienta es muy utilizado para realizar proyectos de este tipo, y de esta manera evitar errores en el diseño que puedan traer como consecuencia, un aumento en los costos de construcción de los mismos [7].

Con el desarrollo de tecnologías de energía alternativas, en particular el aprovechamiento de biogás a través de la energía de la biomasa, se abre la oportunidad para que estos desechos sean utilizados en la producción de energía eléctrica y calórica, además de atender la problemática de impacto ambiental al disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, vectores transmisores de enfermedades y diseminación de malos olores, [9].

En función de lo descrito anteriormente, se pretende diseñar una planta de biogás para la generación de potencias eléctrica destinada principalmente a unidades productivas pecuarias ubicadas en nuestro país donde el servicio de energía eléctrica sea insuficiente o en el caso extremo inexistente.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una Planta de Biogás para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela a través del programa BioDigestor©.

### 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el potencial de biomasa para la producción del biogás.
- Evaluar diferentes tipos de Biodigestores existentes en el mercado, así como parámetros a considerar para establecer los criterios de diseño.
- Dimensionar las plantas de biogás y sus estructuras.
- Diseñar la planta de generación de potencia a través del software BioDigestor©, a fin de caracterizar el diseño de la planta.
- Dimensionar y seleccionar el motorgenerador de potencia eléctrica.
- Simular utilizando matlab®-simulink el motorgenerador seleccionado, a fin de caracterizar su comportamiento eléctrico.
- Seleccionar los equipos que componen la planta de biogas.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

El presente estudio de de investigación pretende, establecer una alternativa de generación de energía eléctrica, diferente a los modelos convencionales, el cual permita, el desarrollo sustentable en el tiempo de las poblaciones de Venezuela donde estén establecidas unidades de producción animal. Para este propósito se han seleccionado el sistema de Planta de Biogás, [5].

El empleo energético de la biomasa presenta numerosas ventajas, no solo para el propietario de la instalación sino para la sociedad en conjunto. En el primero de los casos, las ventajas son fundamentalmente económicas ya que se reduce los costos energéticos al disminuir la cantidad de energía eléctrica que se debe adquirir, [6].

En el segundo caso, el uso de la biomasa presenta, al igual que ocurre con otras energías renovables, numerosas ventajas medioambientales y socioeconómicas. Los excrementos de los animales (cerdos, ganado, pollos, etc.), desechos, basuras y residuos orgánicos se convierten en uno de los desechos más contaminantes en nuestro medio y mucha de las técnicas modernas no logra solucionar económicamente este problema. Los biodigestores no contaminan y transforman estos desechos y los convierten en subproductos aprovechables (recursos) como el bioabono y el biogás, [6].

El empleo de la tecnología de digestión anaeróbica, para tratar la biomasa residual húmeda, además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de

Por último, el país contaría con una de las tecnologías de vanguardia en lo que se refiere a energías alternativas, colocándolo a la par de muchos países desarrollados, que están llevando a cabo este tipo de proyectos, [6].

## 1.4 ALCANCE Y DELIMITACIONES

**De Espacio (geográfico):** El presente trabajo de investigación se limita a las zonas donde estén establecidas las unidades de producción animal, y de otros organismos comunitarios, la investigación se centrara en las necesidades específicas de la misma.

**De Tiempo:** El estudio y recopilación de la información se llevará a cabo desde Junio del 2009 hasta Octubre del 2009. La información recopilada puede ser variable en el tiempo de acuerdo al avance tecnológico y cambios en los procesos.

**De Contenido:** La presente investigación tiene como objetivo principal diseñar una "Planta de Biogás", como fuente de generación de potencia eléctrica estacionaria la cual pueda ser usada, en las unidades de producción animal de Venezuela, para ello se recurrirá a la caracterización del Biodigestor y demás estructuras auxiliares, que comprenden el sistema. Para lograr alcanzar este objetivo es fundamental identificar las características fisicoquímicas de la biomasa que se pretende utilizar, para de esta manera evaluar la cantidad de biogás que es capaz de producir. También, se pretende evaluar en conjunto con los componentes adicionales que conforman una planta biogás (tanque de alimentación, sistema de alimentación, digestor, tanque de descarga, lecho de secado de lodos, tuberías de captación y conducción del biogás, sistema de generación de energía eléctrica y calórica, antorchas), en la búsqueda de estas característica es necesario hacer uso de software que permita la modelación del sistema de planta que se ajuste a los requerimientos previamente establecidos, a través de una simulación, debido a esto se empleará el programa BioDigestor©, para realizar dichas simulaciones. Luego de haber realizado la simulación del sistema de planta de biogás, se realizará un análisis de los resultados que permitirán el dimensionamiento y selección de los generadores.

## 1.5 RECURSOS

En la estimación de los recursos necesarios y disponibles para la realización de esta investigación se tienen:

**Recursos materiales:** Para el logro de los objetivos planteados, se recurrirá a diferentes tipos de documentos, como artículos, textos, normas, etc. Además de documentos electrónicos que se accederán vía Internet, utilizando centros de comunicaciones o a través de la sala de computación de la escuela de potencia de la Universidad de Carabobo (UC).

**Recursos técnicos:** Se necesitarán manuales donde se especifiquen todas las características técnicas tanto de diseño como instalación de Plantas de Biogás, los cuales serán obtenidos a través de páginas web, de acceso en los lugares antes mencionados.

**Recursos humanos:** Se contará con la ayuda del personal encargado de la empresa ITDG- Soluciones Prácticas para la construcción de biodigestores unifamiliares rurales, el personal docente de la Universidad de Carabobo, así como de otras instituciones de educación superior, con conocimientos en la generación de energía eléctrica a través de plantas de biogás, y disponibles a colaborar con la realización de los objetivos planteados.

# CAPITULO II

# MARCO TEORICO

Para el desarrollo de esta investigación el marco teórico se orienta en la búsqueda de trabajos de tesis que cumplan el rigor científico, además de bibliografías estrechamente relacionadas con el tema en estudio, las cuales contribuyen al análisis de la problemática planteada bajo situaciones similares.

## 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1.1. ANTECEDENTES NACIONALES

Las investigaciones citadas a continuación han sido guías para el inicio de las bases teóricas del trabajo que se desea realizar, son éstas las siguientes.

- **Rojas Z. Juan C. (2006). "*Plantas de digestión anaeróbica y producción de biogás en el ámbito domestico, rural, o en general de micro aplicaciones con énfasis para comunidades altas andinas".*** 1er Seminario Internacional Sobre el Uso de Energías Renovables. Caracas, Venezuela, [7]. Este trabajo de investigación sirve de referencia porque el autor describe detalladamente el proceso de producción de biogás a partir de la biomasa, también presenta un análisis muy didáctico acerca de la clasificación de los tipos de plantas existentes en el mercado, proporcionando una idea acerca de las ventajas y desventajas con que cuenta cada modelo para la generación de potencia eléctrica.

- **Rodríguez R, Julio C. (2004). "*Resultados experimentales sobre la producción de biogás a través de la bora y el estiércol de ganado".*** Trabajo de investigación, Universidad de Oriente. Estado Bolívar, Venezuela, [8]. El presente estudio vale como referencia ya que en el mismo el autor deja muy bien sentadas las bases teórico- prácticas para la producción del biogás utilizando las hojas de bora y el estiércol de ganado, muy parecido al modelo de producción de biogás que se pretende conseguir en el desarrollo de esta tesis.

- **Posso, R. Fausto R. (2004). *"Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: sistema energético basado en energías alternativas".*** Trabajo de Investigación, Universidad de Los Andes. Táchira, Venezuela, [9]. La investigación que el autor lleva a cabo en este trabajo sirve como base teórica para el desarrollo del ya que en éste se evalúa el futuro de las energías alternativas, haciendo mención especial de la energía de la biomasa para la generación de potencia eléctrica en Venezuela, Además evalúa los lugares con mayor potencial para la explotación de este tipo de tecnología en nuestro país.

- **Longatt, G. Francisco M. (2007). *"Introducción a los sistemas de transmisión y generación".*** Trabajo de investigación, Universidad Nacional Experimental Politécnica de Fuerza Armada. Maracay, Venezuela, [10]. Esta investigación sirve de antecedente ya que en ella el autor estudia los diversos métodos para generar y transmitir energía eléctrica, incluyendo las fuentes alternativas entre ellas la de la biomasa. También describe las tecnologías para conversión de biomasa en la producción de electricidad como lo es la combustión directa, la gasificación y la pirólisis, explicando en detalle cada uno de estos métodos.

### 2.1.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

A nivel internacional, son muchísimos los antecedentes que se pueden mencionar en cuanto a la utilización de la biomasa para la generación de energía eléctrica. A modo de referencia se pueden indicar algunos enlaces, que incluyen muy buena información sobre plantas de biogás:

- **Patiño, V. Wilfrido. (2008).** *"Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final de Navarro, bajo los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto 2008".* Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Santiago de Cali, Santiago de Cali, Colombia, [11]. En este trabajo el autor identifica los posibles usos del biogás como fuente de energía y define los parámetros mínimos requeridos para llevar a cabo un proyecto de estas características, también cuantifica los benéficos ambientales y sociales que se originan mediante la ejecución del mismo.

- **Hilbert, Jorge A. (2006).** ***"Manual para la producción de biogás".*** Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. Castelar**,** Buenos Aires, Argentina, [12]. El siguiente trabajo sirve como base teórica para la presente investigación, ya que en él se hace una completa evaluación del biogás como fuente de energía alternativa en todos sus aspectos, reseñando tanto su factibilidad económica y tecnológica, como sus posibles impactos sociales, a fin de determinar la viabilidad del proceso en su conjunto.

- **Carrillo, Leonor C. (2003). *"Microbiología agrícola".*** Trabajo de investigación en Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Salta, Argentina, [13]. Esta investigación se presta como antecedente ya que la autora desarrolla un estudio muy completo acerca de los materiales de desechos que se pueden usar para la generación de metano desde el punto de vista microbiológico, clasificando cada una de ellos según su procedencia. De igual forma proporciona ciertos criterios importantes que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar y construir un biodigestor.

- **Bravo D. Francisco Javier. (2002). *"La integración económica y territorial de las energías renovables y los sistemas de información".*** Trabajo especial de grado para optar al título de Doctor. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. [14]. Este trabajo es importante para la investigación que se desarrolla porque el autor analiza el impacto de la liberalización del sector eléctrico de las fuentes de generación de energía convencionales utilizando las energías alternativas renovables, haciendo especial énfasis en las energías de biomasa, solar y eólica. También proporciona un enfoque interesante para la planificación e integración de proyectos de generación de energía alternativa en lugares donde la generación es insuficiente.

## 2.2. BASES TEÓRICAS

En esta parte del capítulo se describen las generalidades acerca del aprovechamiento de la biomasa por medio de una planta de biogás para la generación de energía alternativa.

### 2.2.1. GENERALIDADES

La fermentación anaeróbica se ha venido utilizando desde hace varios siglos en Europa y Asia. Las primeras noticias de su existencia fueron reportadas por Volta (1776), quien descubrió la formación de un gas combustibles sobre pantanos, lagos y aguas estancadas y relacionó la formación del biogás con la cantidad de materia orgánica depositada en sus fondos, [15].

**Figura 2.1. Alejandro Volta [15].**

La primera planta de digestión anaeróbica fue construida en una colonia de leprosos, en Bombay, India 1859. Desde entonces en India se han construido cientos de biodigestores, por otro lado también se han construido miles de digestores en China, Taiwán, Corea, Tailandia, Kenya y Sudáfrica. Se estima que en estos países se han construido más de seis millones de digestores. Los digestores anaeróbicos se extendieron en Inglaterra en 1895, cuando el biogás fue recuperado y usado como combustible en las lámparas externas de las calles de Londres, [15].

En el año 1868, el biólogo inglés Antonio Bechamp definió las reacciones para la producción de biogás como un proceso microbiológico. La ecuación del gas metano CH4 fue descubierto por Amedeo Avogadro en 1821. También se reporta que los ingleses Dalton, Henry y Davy fueron los que desarrollaron en los años 1804-1810, la composición química del gas metano, [15].

**Figura 2.2. Amedeo Avogadro [15].**

En 1884 el químico francés Pasteur, realizó investigaciones del biogás producido de residuos animales. Uno de sus alumnos llamado Gayon, fermentó 1m³ de estiércol de ganado a 35ºC, obteniendo unos 100 litros de biogás. Este ensayo dio tan buenos resultados que Pasteur expuso que se podían utilizar como combustibles para calefacción y para alumbrado público. Tanto fue el eco de estos alcances que hasta se pensó aprovechar el estiércol de los miles de caballos que en esa época servían para transporte público halando las carretas en la ciudad de París, [16].

En el año 1890, Donald Cameron diseñó una gran fosa séptica para la ciudad de Exeter, en Gran Bretaña. Con el gas obtenido alimentó la red de alumbrado público. Durante la segunda guerra mundial muchos granjeros de Inglaterra, Francia, e incluso Alemania construyeron digestores para producir biogás para alimentar tractores y producir electricidad. Estas instalaciones cayeron en desuso a finales de los años 1950 cuando se inició el boom petrolero, [16].

## 2.3. LA BIOMASA

Se conoce con el nombre de biomasa a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, y a la obtenida a partir de éstas mediante transformaciones naturales o artificiales que pueden ser convertidas en energía. La biomasa también se considera como la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica; esa energía es recuperable por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles, [16], [17].

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del Sol. La materia viva (biomasa) es sintetizada por las plantas mediante el proceso denominado fotosíntesis, que tiene lugar en presencia de la luz solar. Las plantas absorben agua y sales minerales del suelo y dióxido de carbono del aire, dando lugar a la formación de hidratos de carbono y oxígeno, que se desprende en forma gaseosa y es devuelto a la atmósfera. En todo este proceso se absorbe energía, la cual queda almacenada en las plantas, [16], [17].

Los animales aprovechan parte de la biomasa de las plantas, apropiándose de su contenido energético y transformándose, así, la biomasa vegetal en animal. La parte restante se puede considerar como biomasa residual, [17].

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, cultivos energéticos, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc; por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar [17].

### 2.3.1. TIPOS DE BIOMASAS

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recurso energético. Aunque se pueden hacer multitud de clasificaciones, en esta monografía se ha escogido la clasificación más aceptada, la cual divide la biomasa en cuatro tipos diferentes: biomasa natural, residual seca y húmeda y los cultivos energéticos.

#### 2.3.1.1. BIOMASA NATURAL

Es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana, [17].

**Figura 2.3. Biomasa Natural [17].**

#### 2.3.1.2. BIOMASA RESIDUAL

Es la que genera cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como, basuras y aguas residuales, [17].

**Figura 2.4. Biomasa Residual [17]**

#### 2.3.1.3. BIOMASA PRODUCIDA

Es la cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en vez de producir alimentos, como la caña de azúcar en Brasil, orientada a la producción de etanol para carburante, [17].

La naturaleza de la biomasa es muy variada, ya que depende de la propia fuente, pudiendo ser animal o vegetal, pero generalmente se puede decir que se compone de hidratos de carbono, lípidos y prótidos. Siendo la biomasa vegetal la que se compone mayoritariamente de hidratos de carbono y la animal de lípidos y prótidos, [13], [17].

### 2.3.2. FUENTES DE EXTRACCIÓN

#### 2.3.2.1. BOSQUES

La única biomasa explotada actualmente para fines energéticos es la de los bosques. No obstante, el recurso de la biomasa de los bosques para cubrir la demanda energética sólo puede constituir una opción razonable en países donde la densidad territorial de dicha demanda es muy baja, así como también la de la población (Tercer mundo), [16], [18].

**Figura 2.5. Bosques [18]**

### 2.3.2.2. RESIDUOS AGRÍCOLAS

En este grupo se incluye todo el material vegetal producido en las explotaciones agrícolas. Comprende los residuos de cultivos leñosos y los residuos de los cultivos herbáceos como la paja de cereal, los restos del cultivo del algodón, el cañote de girasol o maíz, etc. Su disponibilidad depende de la época de recolección y de la variación de la producción agrícola por lo que es recomendable la existencia de centros de acopio de biomasa donde centralizar su distribución, [16], [17].

**Figura 2.6. Restos de cultivos de la caña de azúcar [18]**

### 2.3.2.3. RESIDUOS GANADEROS

Incluye todo residuo biodegradable procedente de la actividad ganadera, y se puede clasificar en estiércol, compuesto por la mezcla de las deyecciones y el material de la cama del ganado; purines, mezcla de deyecciones y el agua de limpieza y arrastre; aguas sucias procedentes del lavado, desperdicios de abrevaderos, deyecciones diluidas; y animales muertos, [13], [17].

**Figura 2.7. Purines de ganado vacuno [18]**

### 2.3.2.4. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Incluye los subproductos derivados de los procesos de producción industrial de productos agroalimentarios, como el bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz, orujo y orujillo de aceituna, etc. [17].

**Figura 2.8. Derivados de los procesos industriales [18]**

## 2.4. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA

Los métodos de conversión de la biomasa en energía pueden ser métodos termoquímicos como la combustión directa, la pirólisis y la gasificación o métodos biológicos como la fermentación alcohólica y la fermentación metánica, [10].

**Figura 2.9. Conversión Energética de la Biomasa [8].**

### 2.4.1. MÉTODOS TERMOQUÍMICOS

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y, en particular, a los de la paja y la madera, [10], [18].

#### 2.4.1.1. COMBUSTIÓN DIRECTA

Es la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire al aplicar altas temperaturas (800 -1000 ºC), en esta reacción se libera agua, gas carbónico, cenizas y calor. Este último es utilizado para el calentamiento doméstico o industrial o para la producción de electricidad, [18].

La tecnología más difundida a escala comercial para llevar a cabo la combustión son las parrillas fijas, horizontales e inclinadas o las móviles y vibratorias. Las calderas de parrilla de biomasa no son diferentes de las usadas con otros combustibles como el carbón, si bien se incorporan modificaciones importantes de diseño para adaptarlas al nuevo combustible. Estas modificaciones pueden ser desde la geometría de la cámara de combustión, hasta las disposiciones de las superficies de intercambio, [18].

En los últimos años se está imponiendo la tecnología de lecho fluido, usado tanto en plantas térmicas como termoeléctricas. La variante más difundida es la de tipo burbujeante, debido a su mayor viabilidad económica en plantas relativamente pequeñas como son las de biomasa, [18].

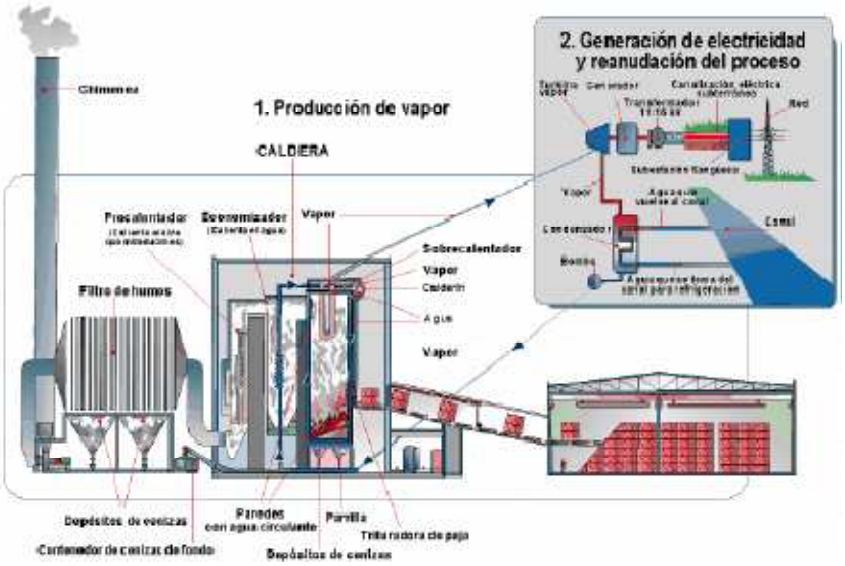



**Figura 2.10. Esquema de planta de biogás por combustión directa [7]**

La tecnología de lecho fluido, presenta la ventaja de trabajar a temperaturas inferiores, lo que disminuye las emisiones de óxidos de nitrógeno y la formación de escorias, así como la de poder trabajar con biomasa heterogénea y con variabilidad del contenido de humedad, [18].

También existen otras tecnologías de menor implantación, los hornos de combustible pulverizado y los de combustión ciclónica, [10], [18].

#### 2.4.1.2. LA PIROLISIS

Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 grados centígrados, se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Aparte de éste, la pirolisis lleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de débil poder calórico, puede servir para accionar motores diesel, para producir electricidad, para mover vehículos.

Una variante de la pirolisis es la pirolisis flash, la cual llevada a 1000 grados centígrados en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirolisis. Las instalaciones en las que se realizan la pirolisis y la gasificación de la biomasa reciben el nombre de gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente como se indica antes, o bien servir la base para la síntesis de un alcohol muy importante, el metanol, que podría sustituir las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol), [10], [18].

### 2.4.1.3. GASIFICACIÓN

Es un proceso de combustión incompleta de la biomasa, efectuado a altas temperaturas (700-1200ºC), aunque en general, inferiores a las de combustión. Como producto principal se obtiene un gas combustible compuesto por hidrógeno, metano y monóxido de carbono. El poder calorífico de este gas, se sitúa en torno a los 4 MJ/Nm³, [10], [18]. La gasificación es una alternativa con mejores rendimientos que la combustión en calderas. El empleo de motores diesel o de turbinas de gas para quemar el gas producido puede elevar el rendimiento a valores por encima del 30%, sin embargo ésta es una opción poco extendida, [18].

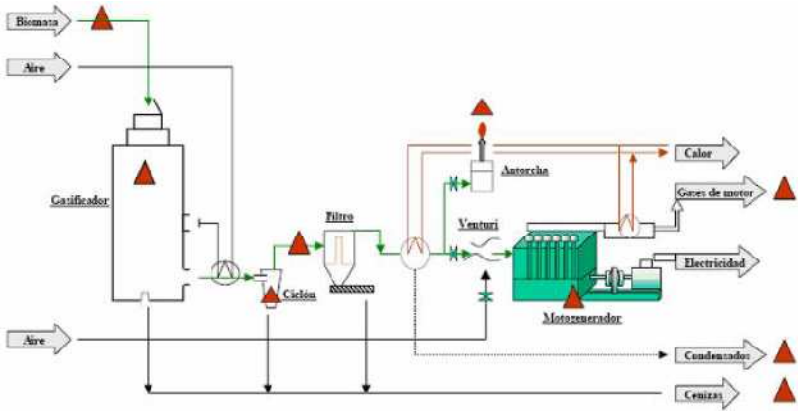



**Figura 2.11. Proceso de gasificación para la generación eléctrica [7].**

Los métodos convencionales usan el aire como agente gasificante, si bien en ocasiones se emplea aire enriquecido en oxígeno, aumentando el poder calorífico del gas resultante, al disminuir el contenido de nitrógeno, [10].

El principal problema que presenta la gasificación de biomasa como tecnología para la generación eléctrica es la limpieza del gas resultante del proceso de las impurezas que lo acompañan, [10].

La gasificación tiene una serie de ventajas:

- El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural.
- Puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad.

### 2.4.2. MÉTODOS BIOLÓGICOS

Se basan en la utilización de diversos tipos de microorganismos que degradan las moléculas a compuestos más simples de alta densidad energética. Son métodos adecuados para biomasa de alto contenido en humedad; los más conocidos son la fermentación alcohólica para producir etanol y la digestión anaerobica, para producir metano,[18].

#### 2.4.2.1. LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Este método convierte los hidratos de carbono de la materia prima por la acción de microorganismos durante dos o tres días bajo condiciones controladas y en presencia de oxigeno. Es decir, transforma la biomasa en etanol obteniendo biocombustible. Este alcohol se produce por la fermentación de azúcares, [18].

Actualmente existen alternativas para la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulosa y presentan bastante interés ya que el coste de la materia prima es menor. Se calcula que en Brasil circulan 2 millones de vehículos que utilizan como combustible el etanol procedente de la fermentación de los residuos de la caña de azúcar, [10], [18].

#### 2.4.2.2. DIGESTIÓN ANAEROBICA

Es la digestión anaerobica de la biomasa por medio de bacterias. Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75% de humedad relativa). En los fermentadores, o digestores, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico. El problema principal consiste en la necesidad de calentar el equipo, para mantenerlo en la temperatura óptima de 30-35 grados centígrados. No obstante, el empleo de digestores es un camino prometedor hacia la autonomía energética de las explotaciones agrícolas, por recuperación de las deyecciones y camas del ganado. Además, es una técnica de gran interés para los países en vías de desarrollo. Así, millones de digestores ya son utilizados por familias campesinas chinas, [14], [18].

## 2.5. BIOGAS

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos; se utiliza principalmente en motores de combustión interna y turbinas a gas para la generación de electricidad y calor, [9].

Dependiendo de las características de la biomasa original, este gas puede tener una composición de entre 50 y 70% de metano (CH4), por lo que posee un buen potencial energético, alcanzando alrededor de 5000 Kcal/m3. El poder calorífico del biogás depende directamente de la concentración de metano. A modo de referencia se puede decir que el poder calorífico de 1m3 de metano es 9,97 kWh. Considerando un contenido de metano del 60% se obtiene aproximadamente 6 kWh/m3 de biogás, [9].

La composición del biogás es muy variada. En general se considera la siguiente:

| Componente | Fórmula | Concentración |
|---|---|---|
| Metano | $CH_4$ | 50 - 75 % vol |
| Dióxido de carbono | $CO_2$ | 25 - 45 % vol |
| Vapor de agua | $H_2O$ | 2 - 7 % vol |
| Oxígeno | $O_2$ | < 2 % vol |
| Nitrógeno | $N_2$ | < 2 % vol |
| Amoníaco | $NH_3$ | < 1 % vol |
| Hidrógeno | $H_2$ | < 1 % vol |
| Ácido sulfhídrico | $H_2S$ | 20 – 20.000 ppm |

**Tabla 2.1. Composición promedio de biogás [9].**

## 2.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS.

La digestión anaeróbica es un proceso natural, que corresponde al ciclo anaeróbico del carbono, por el cual es posible que mediante una acción coordinada y combinada de diferentes grupos bacterianos en ausencia total de oxigeno, éstos pueden utilizar la materia orgánica para alimentarse y reproducirse, como cualquier especie viva que exista en los diferentes ecosistemas, [16].

Cuando se acumula materia orgánica (compuesta por polímeros como carbohidratos, proteínas, celulosa, lípidos, etc.) en un ambiente acuoso, los microorganismos aeróbicos, actúan primero, tratando de alimentarse de este sustrato.

Este proceso consume el oxigeno disuelto que pueda existir. Luego de esta etapa inicial, cuando el oxigeno se agota, aparecen las condiciones necesarias para que la flora anaeróbica se pueda desarrollar, consumiendo también, la materia orgánica disponible. Como consecuencia del proceso respiratorio de las bacterias ($CO_2$ ) y trazas de Nitrógeno ($N_2$), Hidrogeno ($H_2$) y Ácidos Sulfúrico ($H_2S$), [19].

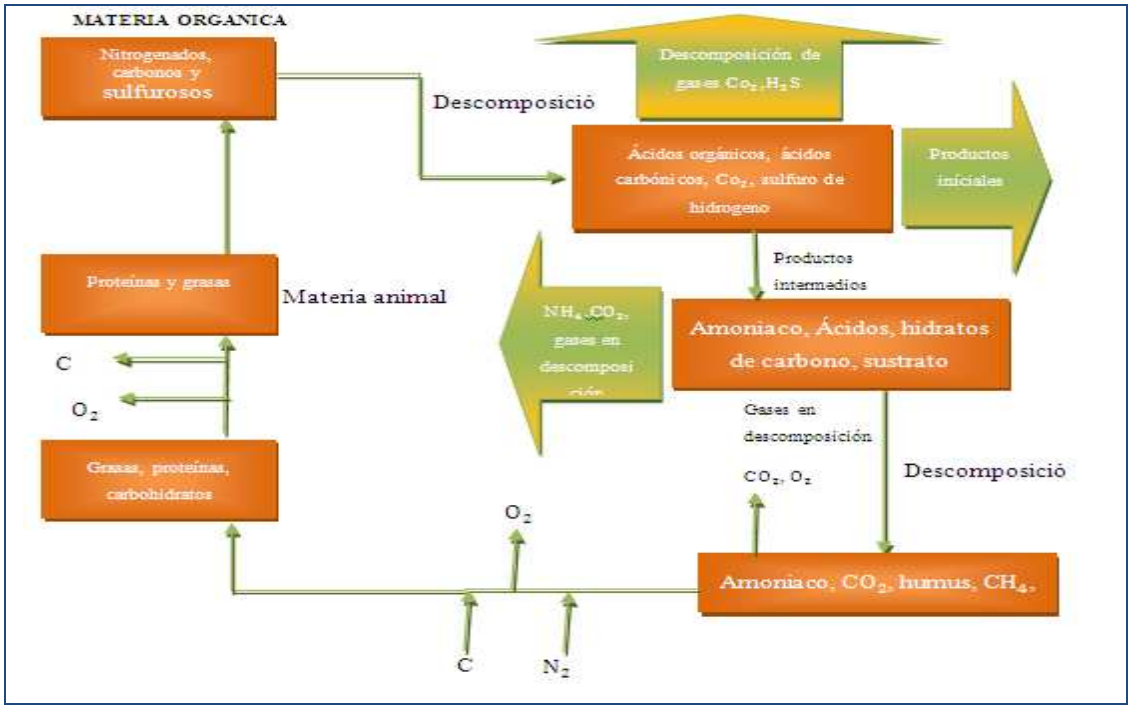



**Figura 2.12. Ciclo Anaeróbico [14]**

Aunque la digestión anaeróbica es un proceso ampliamente conocido, en la práctica existe todavía información muy limitada sobre los procesos químicos que la ocasionan y su microbiología bacteriana. Sin embargo, se puede firmar en líneas generales que la digestión anaeróbica se desarrolla en cuatro etapas durante las

cuales la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para la obtención de biogás y bioabono, como productos finales, por la acción de diferentes tipos de bacterias. Para la de explicación de la digestión anaeróbica se definen las siguientes etapas, [19].

### 2.6.1. HIDRÓLISIS:

En esta etapa la materia orgánica es metabolizada por los microorganismos, se descomponen las cadenas largas de materia orgánica en otras más cortas, obteniéndose los productos intermedios. La materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas anaeróbicas que hidrolizan las moléculas solubles en agua, tales como grasas, proteínas y carbohidratos y las transforman en polímeros más simples. Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidroliticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros, [14], [19].

### 2.6.2. ACIDOGÉNESIS:

En esta fase se convierte los productos intermedios en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono. Estas dos primeras fases las llevan a cabo un primer grupo de bacterias, las hidroliticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples (acéticos mayormente). Son bacterias anaeróbicas facultativas (pueden consumir oxígeno molecular para su metabolismo, se adaptan a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno resulta toxico en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaeróbico ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano

en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no hay una reducción significativa de la DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejos se transforman en cadenas más cortas, son consumo o reducción de la materia orgánica presente, [14], [19].

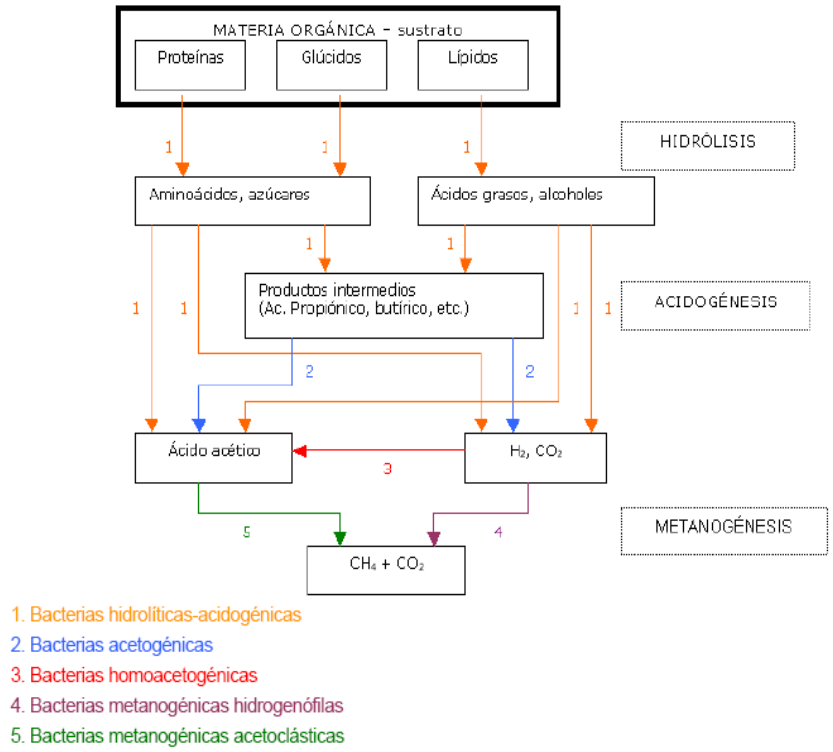



**Figura 2.13. Esquema simplificado proceso anaeróbico [13]**

### 2.6.3. ACETOGÉNESIS

Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácidos acéticos, llevándolos al grupo acético $CH_3$-COOH y liberando como productos hidrogeno y dióxido de carbono que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. Esta reacción es endoexergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las

bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias ecetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que desencadena la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación, manteniéndose el equilibrio energético, [14], [19].

### 2.6.4. METANOGÉNESIS

En esta fase un segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaeróbicas, es decir, que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de bacterias metanogénicas, las hidrogenólicas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestion de la materia orgánica, [14], [19].

## 2.7. FACTORES AMBIENTALES Y OPERATIVOS QUE DEBEN CONTROLARSE EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

### 2.7.1. CONCENTRACIÓN DE LA CARGA AL BIODIGESTOR

Toda materia orgánica residual que se destine como alimentación del biodigestor, generalmente está compuesta por una importante cantidad de agua y una fracción sólida caracterizada por la concentración de sólidos totales (ST). Para mejores resultados, es necesario calcular el volumen de agua para diluir la materia

prima, hasta la proporción adecuada, de acuerdo al contenido de sólidos del residuo a utilizar, [8].

### 2.7.2. MEDICIÓN DEL PH

El rango aceptable de trabajo de las bacterias metanogénicas se encuentra entre 6,5 y 7,5; es decir un medio prácticamente neutro. Un pH inferior a 6 indica descompensación entre la fase acidogénica y metanogénica, pudiéndose bloquear esta última. Se aconseja no aumentar repentinamente la velocidad de carga, procurar suavizar los cambios bruscos de temperatura dentro del biodigestor y, evitar introducir compuestos tóxicos (como estiércol de animales tratados con antibióticos, residuos con herbicidas, etc.). Para ayudar a mantener y corregir el pH ácido más rápidamente, se puede adicionar cal, o agua de cal, [8].

### 2.7.3. TEMPERATURA

El proceso se lleva a cabo satisfactoriamente en dos rangos bien definidos, entre 10°C y 37°C, para la flora mesofílica y, entre 55°C a 60°C para el rango termofílico. Para que las bacterias trabajen en forma óptima, se requiere mantener la temperatura lo más constante posible, es decir sin bruscas variaciones durante el día. El proceso fermentativo anaeróbico no genera una cantidad apreciable de calor, por lo tanto las temperaturas mencionadas deben lograrse desde el exterior.

El proceso mesofílico es más estable, y más adecuado para utilizar en el medio rural, con biodigestores de pequeño volumen y bajo costo, aptos para una escala familiar, explotaciones tamberas y pequeñas comunas, [8].

### 2.7.4. AGITACIÓN

La generación del biogas depende además del íntimo contacto entre bacterias, la materia prima en degradación y los compuestos intermediarios, producto de las diferentes etapas del proceso fermentativo. En consecuencia, la agitación de la masa en digestión es sumamente beneficiosa para el buen funcionamiento del proceso. Con biodigestores operando en el nivel mesofílico se requiere una leve agitación, siendo suficiente un movimiento intermitente realizado con algún elemento mecánico, [8].

## 2.8. PARTES DE UNA PLANTA DE BIOGAS

Entre las principales partes que conforman una planta de biogás tenemos las siguientes:

### 2.8.1. TANQUE DE ALIMENTACIÓN

Este elemento está destinado para el almacenamiento de todo el estiércol que va a ser utilizado dentro del proceso de generación de biogás, el tanque posee entonces una entrada para el estiércol recogido, junto con una salida hacia el sistema de alimentación, [11], [12].

### 2.8.2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Comunica al tanque de alimentación con el biodigestor propiamente dicho, por él circula el material ya preparado, que generalmente ingresa por acción de la gravedad, al estar ubicada el sistema de alimentación por sobre el nivel de líquido en el biodigestor. Conviene que la conducción sea recta, sin curvas que puedan producir

que el material se atasque en el ingreso, y que permita también una fácil limpieza, [11], [12].

### 2.8.3. DIGESTOR DE ALIMENTACIÓN

El digestor es básicamente un cilindro o contenedor sellado por donde entran las materias a tratar, convenientemente humedecidas. Dentro no hay oxigeno y las bacterias anaerobicas se multiplican y procesan la materia orgánica, produciendo gas metano, [13].

Los digestores se clasifican de acuerdo al proceso o modo de operación, llenado y vaciado. La clasificación general los define en digestores de régimen estacionario o lotes, de régimen semicontinuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo, [13].

#### 2.8.3.1. DIGESTORES DE CARGA EN BATCH

De lote o batch: se cargan una vez en forma total o por intervalos durante varios días. La descarga se efectúa cuando se ha descargado la totalidad de la materia orgánica y ya no se produce biogás. Es aplicable cuando se presentan problemas operativos (falta de personal) o cuando la materia orgánica no existe en forma continua. Ventajas de este tipo de digestores: Pueden procesar una gran variedad de materiales. La carga puede recopilarse en campo abierto porque aunque tenga tierra u otro inerte mezclado, no entorpece la operación del Biodigestor. Admiten cargas secas que no absorban humedad, así como de materiales que flotan en el agua. Su trabajo en ciclos, los hace especialmente aptos para los casos en que la disponibilidad de materia prima no sea continua, sino periódica. No requiere prácticamente ninguna

atención diaria. Las principales desventajas son: La carga y descarga requiere un considerable y paciente trabajo**,** [7], [18].

#### 2.8.3.2. HORIZONTALES O DE DESPLAZAMIENTO

Generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal. Utilizan el sistema de operación semicontinuo, entrando la carga por un lado y saliendo el lodo por el otro extremo, [7], [18].

##### 2.8.3.2.1. DIGESTORES DE RÉGIMEN SEMICONTINUO

Se utilizan generalmente en áreas rurales y en pequeñas granjas agrícolas. Son sistemas de uso doméstico. Se cargan por gravedad una vez al día con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de retención. Producen una cantidad de biogás y fertilizante constante durante todo el día, [7], [18].

##### 2.8.3.2.2. DIGESTORES DE RÉGIMEN CONTINUO:

Este tipo de digestor se desarrolló principalmente para el tratamiento de aguas residuales y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de todo tipo de sustratos. Se les utiliza para plantas de biogás para la producción de energía eléctrica. Son digestores de gran tamaño en los que se emplean equipos comerciales para alimentarlos, para su agitación y control. Este tipo de digestor es el más utilizado en Europa y en plantas industriales en Latino América. Éstas se cargan diariamente en forma periódica; la biomasa debe ser fluida y homogénea, y las plantas se pueden automatizar con facilidad, lo que permite controlar la digestión, con el grado de precisión que se requiere, [7], [18].

Al mismo tiempo, permite corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso, en cuanto es detectada. Permite manejar las variables relacionadas, carga específica, tiempo de retención y temperatura, a largos periodos. La tarea de puesta en marcha solo se vuelve a repetir cuando hay que vaciarlo por razones de mantenimiento. Las operaciones de carga y descarga de biomasa y fertilizante no requieren ninguna operación especial, [7].

Las desventajas de este tipo de digestores son la baja concentración de sólidos que admiten, al no poseer un diseño apropiado para tratar materiales fibrosos, o aquellos cuyo peso específico sea menor que el del agua. En ocasiones tienen problemas de limpieza de sedimentos, espuma e incrustaciones. Para mejorar la producción de metano de este tipo de biodigestores, es conveniente mejorar los sólidos volátiles, es decir que en la mezcla de estiércoles se encuentre balanceada la cantidad de Carbono/Nitrógeno, que sea homogénea en cuanto no hayan impurezas como trozos de materia mayores a 1 cm3, que se encuentre con niveles de pH, balanceados y que posea una alta cantidad de organismos metanizantes, [7].

Los biodigestores industriales de gran tamaño no solo tienen en cuenta la temperatura de la biomasa, o el pH, sino la cantidad y calidad de los sólidos volátiles que se ingresa, teniendo en cuenta que ésta es parte integrante de cualquier tipo de biomasa, [7].

#### 2.8.3.3. COMPLEMENTOS MEZCLADOS (CSTR).

A diferencia de los anteriores, estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato en cuestión. La principal desventaja de estos digestores la constituyen las bajas

velocidades de carga con que pueden ser operados y los relativamente altos tiempos de retención requeridos, unido a la complejidad de mezclados, sobre todo en su construcción y mantenimiento. Este tipo de digestores se construye en acero u hormigón. Son mezclados por agitadores y trabajan en rangos de temperatura mesofilica y termofílica y se los utiliza muy eficientemente para degradar desechos sólidos. Tienen altos costos de construcción y operación pero un elevado rendimiento de metano. La mayoría de las plantas industriales para la producción de biogás que se construyen en Europa se basan en este sistema, [7], [18].

#### 2.8.3.4. DIGESTORES DE DOS ETAPAS:

Existen múltiples combinaciones de digestores de dos etapas. La concepción de estos sistemas está basada en el hecho de que varios grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica compleja requieren de diferentes condiciones de pH y tiempo de retención para su óptimo crecimiento. En estos sistemas, en el primer digestor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en el segundo se lleva a cabo la acetogénesis y metagénesis del material acidificado.

Las variantes estudiadas de estos sistemas de doble etapa presentan como desventajas largos tiempos de retención hidráulicos, requeridos en la primera fase del tratamiento y las bajas eficiencias de conversión. Aún con la aplicación de digestores de alta tasa en la segunda etapa, la velocidad de conversión total y la eficiencia global es determinada por la etapa de la hidrólisis y acidificación, por lo que cualquier estudio en cuanto al mejoramiento de la velocidad de esta primera etapa sería de gran importancia a los efectos económicos de esta variante, [7], [18].

#### 2.8.3.5. DIGESTION SECA

Este tipo de digestión es referida al proceso de degradación de residuos orgánicos con concentraciones de sólidos totales del orden del 20% o superiores. La definición "seca" no es técnicamente muy clara ya que siempre se utiliza un medio acuoso para la digestión anaeróbica.

Las principales ventajas de este sistema son. Bajos consumos de agua; solamente se requiere una minina cantidad de agua para llevar a cabo el proceso. El volumen del digestor es relativamente pequeño, debido a la alta densidad de materia orgánica con que es operado. Los requerimientos energéticos, con el fin de mantener una temperatura controlada del sistema son bajos (producción endógena), [7], [18].

### 2.8.4. LECHO DE SECADO DE LODO

Éste se encarga de recoger y secar la mezcla digerida por el digestor, para luego ser empleada en la producción de bioabono. El lecho se encuentra bajo el nivel del piso y posee una capacidad de aproximadamente tres veces la del tanque de recolección, [13].

### 2.8.5. TUBERÍA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DEL BIOGÁS

Estas tuberías recogen el gas proveniente del biodigestor y lo conducen hacia el sistema de purificación del biogás, generalmente están hechas de PVC para gas natural, y disponen de válvulas de bola al principio y al final de la línea, junto con dos manómetros en las mismas posiciones, [13].

### 2.8.6. SISTEMA DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

El gas, tal cual sale del digestor, debe ser acondicionado a fin de asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos que se alimentan de él. A pesar de que alguno de estos acondicionamientos no son necesarios en todos los casos, otros como el drenaje del agua de condensación deberá realizarse siempre, [13].

#### 2.8.6.1. DRENAJE

El biogás que sale del digestor está saturado de vapor de agua, a medida que se enfría el vapor se condesa en las cañerías y si no se lo evacúa adecuadamente pueden bloquearse los conductos con agua, [13]. Por esta razón las cañerías de distribución deben ser instaladas con una pendiente mínima del 1% hacia un recipiente denominado trampa de agua donde ésta se almacena y se extrae. Existen diversos tipos de trampas de agua tanto manuales como automáticas, que son las recomendadas porque requieren de un mínimo mantenimiento, [13].

#### 2.8.6.2. ELIMINACIÓN DEL CO2

El dióxido de carbono no tiene ningún poder calorífico y debe ser calentado en la combustión. Su eliminación no es aconsejable salvo en los casos de almacenaje del biogas a altas presiones debido a que sería inútil gastar energía de compresión y volumen de almacenaje de alto costo en un gas que no daría ningún beneficio adicional, [17].

Se utilizan varios sistemas entre los cuales los más difundidos son los que emplean su disolución en agua a presión y otros que usan mezclas químicas de gran complejidad, [17].

### 2.8.6.3. ELIMINACIÓN DEL H2S:

Determinados equipos requieren que el gas a utilizar se encuentre libre de SO2, debido a que el mismo combinado con el agua da como resultado ácido sulfhídrico que corroe las partes vitales de algunas instalaciones, [17].

El método más utilizado es hacer pasar el gas por un filtro que contiene hidróxido de hierro. El H2S del gas se combina con el hierro formando sulfuro de hierro según la fórmula descrita más abajo. Esta reacción es reversible y el hidróxido de hierro puede ser regenerado exponiendo el sulfuro al aire con cuidado debido a que la reacción es exotérmica, liberando 603 kJ, [17].

$$2Fe\,(OH)_3 + 3H_2S \qquad Fe_2S_3 + 6H_2O + 63\ KJ \qquad (1)$$

$$Fe_2S_3 + 1{,}5O_2 + 3H_2O \qquad 2Fe(OH)_3 + 1{,}5S_2 + 603KJ \qquad (2)$$

### 2.8.7. TANQUE DE ALIMENTACIÓN DEL BIOGÁS

La forma más simple es almacenar el gas proveniente del biodigestor, es tal cual se obtiene, a baja presión, para ello se utilizan generalmente gasómetros. La producción de gas por lo general debe ser mayor que el consumo, por lo que el excedente se almacena en un tanque de alimentación que está proveyendo de combustible constantemente a los sistemas de generación de energía eléctrica o calórica, [13]

### 2.8.8. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA O CALÓRICA

A partir del tanque de alimentación, el biogás es conducido por presión de la tubería hacia los generadores, donde se produce la transformación de energía mecánica a energía eléctrica, [19].

## 2.9. PROCESO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS

Las sustancias orgánicas como por ejemplo, los estiércoles o destríos agrícolas, son llevadas a lo que se conoce como digestor. Una vez allí, los residuos son introducidos, a través de bombeo o mediante un cargador automatizado, en los digestores anaeróbicos, [12].

Los residuos permanecen entre 50 y 75 días sometidos a condiciones constantes de ausencia de oxígeno y una temperatura de entre 35 y 40ºC. En este escenario, las bacterias descomponen las sustancias provocando que la mayor parte de la materia orgánica se digiera. A continuación, el gas generado se purifica y se desulfura para convertirse así en el valioso biogás, [12].

El biogás es valorizado en motores de cogeneración que transforman la energía del metano en electricidad y calor. La electricidad producida puede suministrarse a la red pública, mientras que la calefacción puede emplearse para cualquier otro fin (calefacción de las granjas, procesos industriales, etc.), [12].

Las materias primas orgánicas no se descomponen por completo dentro del digestor. Cuando los residuos salen de los digestores se han transformado en fertilizante de alta calidad, [12].

## 2.10. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El biogás se aprovecha como combustible en motores de combustión interna acoplados a una maquina sincrónica funcionado como generador para la producción de energía eléctrica.

La generación de la energía eléctrica depende, tanto del contenido del gas metano, como de la eficiencia de los motores de combustión interna y de los generadores (maquina sincrónica). La producción de energía eléctrica es de aproximadamente 6.8kWh/$m^3$ de biogás, [19].

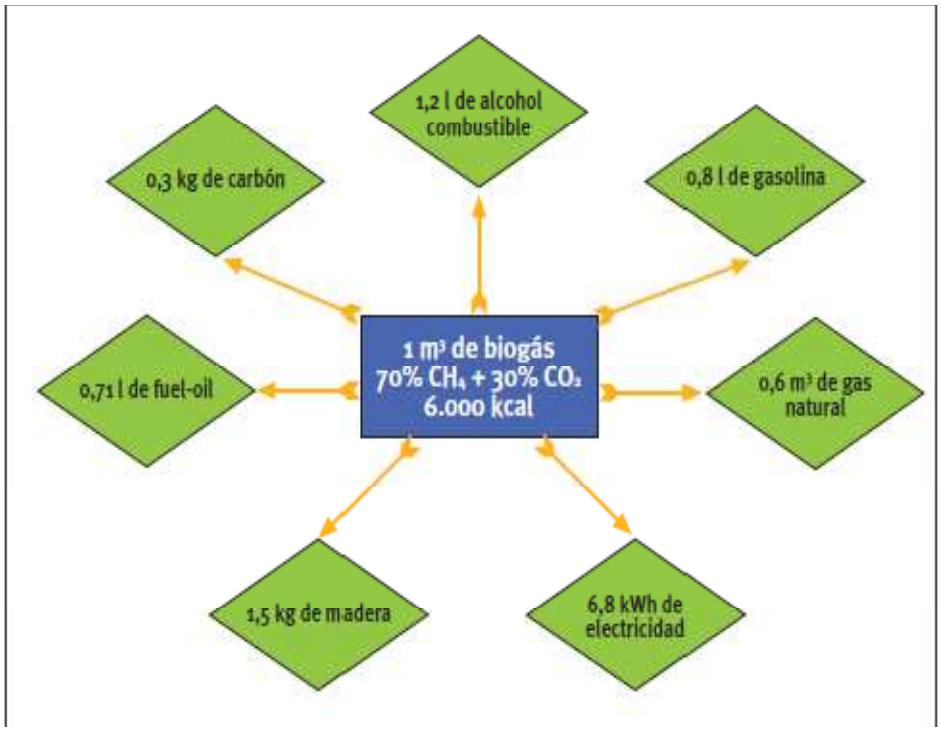



**Figura: 2.14 Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía**

## 2.11. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Son motores térmicos que como su nombre lo indica, su funcionamiento se basa en la combustión de un producto en su interior. Este producto es llamado combustible, el cual es mezclado con aire formando una mezcla gaseosa-combustible. Esta mezcla arde en el motor, dilatándose y desarrollando una fuerza que se emplea para realizar movimiento, [20].

### 2.11.1. COMPONENTES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE ENCENDIDO POR CHISPA.

Para poder estudiar el funcionamiento de los motores de combustión interna, se debe presentar primero una breve explicación de los componentes más importante que lo conforma. En la figura 2.15 se presenta en forma esquemática la sección trasversal de un motor de combustión interna de encendido por chispa. En esta figura se señalan las partes principales del motor las cuales hacen posible su funcionamiento, [20].

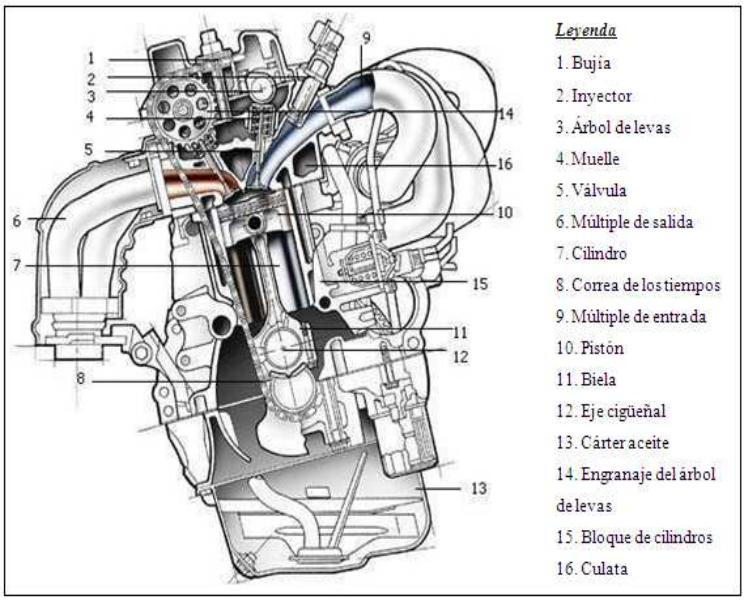



**Figura: 2.15 Motor de Combustión Interna**

- Bloque de cilindros: sirve de apoyo para los cilindros y encierra algunos órganos del motor así como los pistones, las bielas, el cigüeñal y cojinetes de bancada a los que protege del polvo y del agua. Está dividido en dos partes: cárter superior o bancada y cárter inferior, que se une a la altura del cigüeñal, [20].

- El cilindro: En su interior tiene lugar la explosión de la mezcla, y dentro de él se desliza el pistón con un movimiento alternativo, [20].

- La culata: Recubre todos los cilindros del motor, en ella se instalan las válvulas de admisión y de escape así como las bujías y los inyectores en caso de que el motor alimentado por inyección. En su parte lateral recibe el múltiple de salida y el múltiple de escape, [20].

- El pistón: es una pieza que tiene forma de vaso invertido y recibe la presión originada por la explosión de la mezcla dentro del cilindro. Posee un orificio que lo atraviesa y sirve para alojar el pasador o eje del pistón, llamado bulón al que se sujeta el pie de la biela, [20].

- La Biela: Es la encargada de transformar el movimiento alternativo del pistón en un movimiento rotativo del eje del cigüeñal. En ella se pueden distinguir tres partes fundamentalmente: cabeza, cuerpo, pie. El pie de la biela es la parte que se une al pistón por medio del bulón, el cuerpo es la parte rígida que se encuentra entre la cabeza y el pie. La cabeza de biela, está pegada al cuerpo de y gira sobre el codo del cigüeñal, [20].

- El cigüeñal: El cigüeñal o árbol motor, recibe el impulso de las explosiones de cada cilindro, impulso que hace girar el volante, y este a su vez, hace girar al cigüeñal en los tiempos de escape, admisión, compresión siguientes. Del giro de este obtienen su movimiento por medio de engranajes o cadenas los órganos de distribución, encendido y engrase, [20].

- El volante: acumula inercia y regulariza el movimiento del motor. Consiste en una rueda pesada que se coloca en el extremo del cigüeñal más próximo a la caja de cambio, [20].

### 2.11.2. TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN EL ESTUDIO DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Para hacer un estudio de los motores de combustión interna, es necesario conocer la terminología usada para determinar algunas dimensiones y valores fundamentales, los cuales se describen a continuación, [20]:

- Calibre: (D) diámetro interior del cilindro. Se expresa en mm.

- Radio: (r) radio del cilindro. Se expresa en mm.

- Carrera: (L) El recorrido del plano de la cabeza del pistón, durante sus movimientos alternativos dentro del cilindro, distancia entre el PMS y el PMI, se expresa en mm.

- PMS: Punto muerto superior; el que limita la cámara de explosión.

- PMI: Punto muerto inferior; el que determina el máximo volumen del cilindro.

- $V_u$: Volumen unitario del cilindro. Es el volumen que ocupa el cilindro desde el PMS hasta el PMI, se expresa en cm³.

$$V_u = \pi r^2 L \quad (3)$$

- Vt: Cilindrada total del motor. Es el volumen que ocupa el cilindro desde el PMS hasta el PMI multiplicado por el nº de cilindros, se expresa en cm³.

$$V_t = \pi r^2 L \#\text{Cili} \quad (4)$$

### 2.11.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS

En los motores de combustión interna de encendido por chispa, la fuerza motriz es producida por el efecto de la expansión térmica de una mezcla gaseosa, que ha sido comprimida en el interior de los cilindros y que al quemarse actúa sobre los pistones, los cuales, por intermedio de las bielas, impulsan al cigüeñal en un movimiento de rotación continúa, [21].

El combustible comienza su recorrido desde el tanque de combustible hasta el carburador, mezclándose allí con el aire en proporciones definidas. En el caso de los motores de inyección, se inyecta el gas directamente en el cilindro o en los conductos que permiten la entrada del aire al motor, [21].

La mezcla es precalentada para poder garantizar la mejor combustión posible, en el momento de la emisión de la chispa por parte de la bujía. Los cilindros, lugar en

que se llevarán a efecto las explosiones que harán girar el cigüeñal, contiene dos o más válvulas, unas que permiten la entrada de la mezcla, y las otras la evacuación de los gases quemados. En ese momento comienza el ciclo de cuatro tiempos o ciclo de Otto: Admisión, Compresión, Fuerza y Escape, [21].

### 2.11.4. CICLO DE OTTO TEÓRICO PARA MOTORES DE CUATRO TIEMPOS.

El ciclo Otto es el ciclo termodinámico ideal que se aplica en los motores de combustión interna. Se caracteriza porque todo el calor se aporta a volumen constante. El ciclo de Otto teórico así como lo explica Dante Giacosa (1970) es el ciclo ideal, y se representa gráficamente con un diagrama cuyas coordenadas son p-v (presión-volumen), así como lo muestra la figura 2.16.

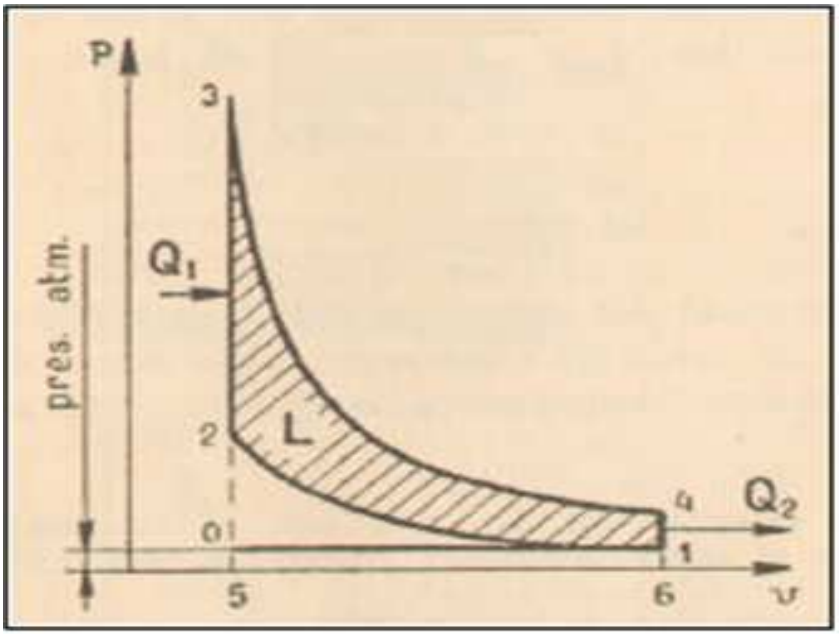



**Figura: 2.16 Ciclo Teórico de Otto.**

Los puntos 2-1 representan el punto muerto inferior y el punto muerto superior respectivamente. Esto quiere decir que el intervalo comprendido entre estos dos puntos es la cilindrada del motor. La mezcla gaseosa-combustible se introduce en el cilindro durante la carrera de aspiración 0-1, lo cual se representa gráficamente en el diagrama p-v con una línea horizontal y a presión constante. La fase de compresión está representada por los puntos 1-2 de la gráfica, corresponde al estado del fluido en el punto muerto inferior y el punto muerto superior del pistón. En los puntos 1-2 la compresión es adiabática, es decir que se sufre una transformación termodinámica adiabática (sin intercambio de calor con el exterior). Al final de la compresión puntos 2-3, se produce la explosión a volumen constante. En este momento, comienza la expansión en la que ocurre una transformación termodinámica adiabática y la cual se representa con los puntos 3-4. En este instante sobreviene el escape, otra vez a volumen constante. Durante esta fase del ciclo se sustrae calor mientras la presión desciende desde 4-1.

### 2.11.5. LEYES QUE RIGEN EL FUNCIONAMIENTO DEL CICLO OTTO EN UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA QUE FUNCIONA CON GASES.

La ley de Boyle – Mariotte, la de Charles, la de Gay-Lussac, la de Avogadro y la ley de los gases ideales, son las leyes comúnmente utilizadas en los procesos de admisión, compresión, potencia y escape que conforman el ciclo de Otto de un motor de combustión interna, dependiendo de las características intrínsecas que conforman cada proceso, [22].

La materia puede presentarse en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. En este último estado se encuentran las sustancias que denominamos comúnmente "gases", [22].

Según la teoría atómica las moléculas pueden tener o no cierta libertad de movimientos en el espacio; estos grados de libertad microscópicos están asociados con el concepto de orden macroscópico. La libertad de movimiento de las moléculas de un sólido está restringida a pequeñas vibraciones; en cambio, las moléculas de un gas se mueven aleatoriamente, y sólo están limitadas por las paredes del recipiente que las contiene, [22].

Se han desarrollado leyes empíricas que relacionan las variables macroscópicas en base a las experiencias en laboratorio realizadas. En los gases ideales, estas variables incluyen la presión (p), el volumen (V) y la temperatura (T), [22].

La ley de Boyle – Mariotte, relaciona inversamente las proporciones de volumen y presión de un gas, manteniendo la temperatura constante (proceso adiabático, fase de compresión y expansión en el ciclo Otto), [22]:

$$P_1.V_1 = P_2.V_2 \quad * \tag{5}$$

La ley de Gay-Lussac, afirma que el volumen de un gas, a presión constante, es directamente proporcional a la temperatura absoluta (proceso isobárico, fase de admisión y escape), [22]:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad * \tag{6}$$

La ley de Charles sostiene que, a volumen constante, la presión de un gas es directamente proporcional a la temperatura absoluta del sistema (proceso isocórico, fase de combustión y escape), [22]:

* En ambos casos la temperatura se mide en kelvin (273 ºK = 0ºC) ya que no podemos dividir por cero, no existe resultado, [22].

La ley de Avogadro afirma que el volumen de un gas es directamente proporcional al número de moles cuando P y V son constantes, [22]:

$$\frac{V}{n} = k \tag{7}$$

Lo que nos permite deducir que volúmenes iguales de gases distintos tienen el mismo número de moléculas cuando P y T son constantes. O dicho de otro modo, el volumen de un número de moléculas es independiente de su identidad química. Se ha demostrado que el volumen en condiciones normales (0° C 1 at) de un mol de gas es 22,4 l. Estas tres leyes se engloban en la ley de los gases ideales, resumida en esta fórmula, [22]:

$$P.V = n.R.T \tag{8}$$

### 2.11.6. CICLO DE OTTO DE CUATRO TIEMPOS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Para entender el ciclo de Otto se debe explicar primero que se entiende por ciclo del motor. Se le llama Ciclo del motor a la sucesión de operaciones que el combustible ejecuta y repite con ley periódica. La duración del ciclo es medida por el número de carreras realizadas por el pistón para poder efectuar el ciclo, [20].

Se dice que los motores son de cuatro tiempos cuando el ciclo se completa en cuatro carreras del pistón, es decir que se realiza un ciclo cada dos revoluciones del

eje cigüeñal del motor. El ciclo de Otto para un motor de combustión interna de cuatro tiempos consta de las siguientes fases:

El tiempo de admisión se muestra gráficamente en la figura 2.17, idealmente expresándose en esta etapa en la cámara de combustión se abre a su debido tiempo la válvula de admisión, permitiendo la entrada de la mezcla pulverizada. La válvula comienza a abrirse antes de realizarse la carrera y se cierra después de realizarse la carrera. Mientras ocurre el tiempo de admisión la válvula de salida se encuentra cerrada y el pistón se encuentra en su carrera hacia el Punto Muerto Inferior (P.M.I), [20].

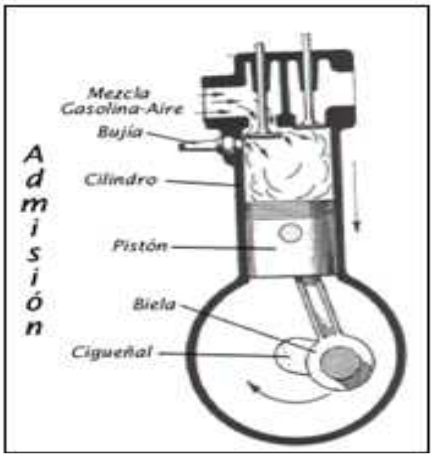



**Figura: 2.17 Fase Admisión**

En el tiempo de compresión, mostrado gráficamente en la figura 2.18, se encuentran ambas válvulas cerradas. Debido a que este tiempo se desarrolla cuando el pistón se encuentra en su carrera hacia Punto Muerto Superior (P.M.S); la mezcla pulverizada es comprimida en la parte superior del cilindro. Justo antes de llegar al tope máximo de la carrera del pistón, la bujía emite la chispa que genera la explosión dentro de la cámara de combustión para comenzar el tiempo de potencia, [20].

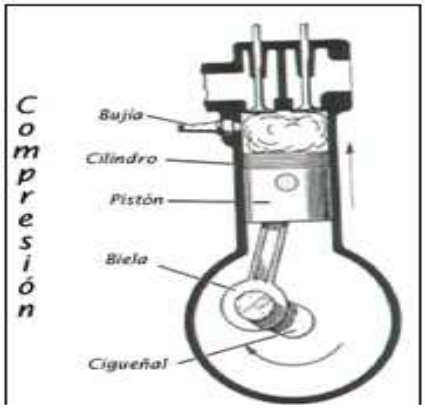



**Figura: 2.18 Fase Compresión**

En el tiempo de potencia (figura 2.19), poco después del final de la carrera de compresión se produce el encendido de la mezcla por medio de una chispa eléctrica producida por la bujía en la cámara de combustión. La mezcla es quemada, aumentando la temperatura y presión, produciendo la expansión de los gases de la combustión, los cuales ejercen una presión sobre el pistón, el cual es enviado hacia abajo proporcionándole una potencia de movimiento al cigüeñal. Cabe destacar, que ambas válvulas continúan cerradas para mantener la presión. Justo antes de que el pistón llegue al P.M.I., se abre la válvula de escape, para dejar salir los gases de la combustión y así comenzar con el tiempo de escape, [20].

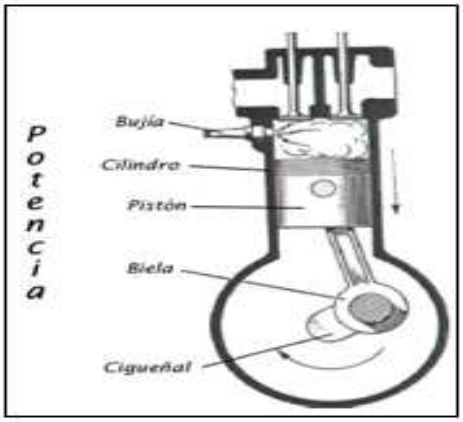



**Figura: 2.19 Fase Potencia**

En el tiempo de escape (figura 2.20), en esta fase se abre la válvula de escape para permitir la salida de los gases quemados de la combustión. Durante este tiempo, el pistón se encuentra en su carrera hacia el P.M.S. ejerciendo presión de salida sobre los gases quemados para así evacuar los productos de la combustión. Justo antes de llegar al P.M.S., se abre la válvula de admisión para así comenzar de nuevo el ciclo, [20].

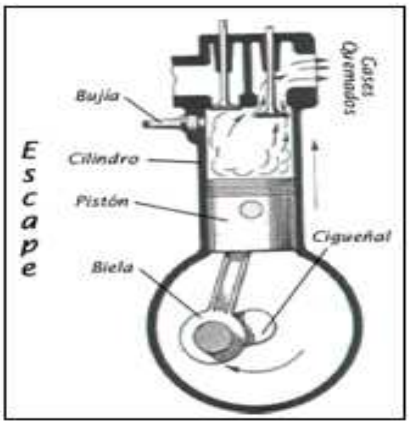



**Figura: 2.20 Fase Escape**

### 2.11.7. CONSIDERACIONES DE UN MOTOR REAL

A diferencia del modelo teórico del motor Otto, las perdidas irreversibles de energía térmica que caracterizan al motor Otto real, son originadas por la fricción de los mecanismos constitutivos del motor, que obligan a generar pérdidas por transferencia de calor hacia medios refrigerantes y por los escapes de la combustión. Esto permite indicar que el rendimiento térmico del motor Otto real es variable según las circunstancias operativas del motor, [21].

Es relevante el hecho, que los motores ideales y reales muestran mayor rendimiento cuando aumenta la relación de compresión, pero es de interés la cuestión práctica de esta relación, como se indican a continuación:

a) En un motor real la relación compresión está limitada por la temperatura del estado 2, si tal temperatura fuera elevada la mezcla aire-combustible se encendería espontáneamente en el momento impropio, [21].

b) Si bajo una misma relación de la mezcla combustible, un aumento de la relación de compresión (ver figura 2.21) promueve un aumento de la temperatura y presión en el punto 3, esto conlleva a diseños de motores de alta exigencia propio de las altas temperaturas y presiones de trabajo, como además la importancia de los sistema de refrigeración del motor y sus pérdidas de energía térmica por las camisas del motor, en otras palabras el aumento de la relación de compresión significa que hay un aumento del área de pared de los cilindros y de su temperatura promedio, en tal sentido, mayores son los caudales del refrigerante a utilizar, pero limitado por el punto de ebullición de refrigerante, estabilidad de la película de aceite en la pared de los cilindros y las propiedades de los materiales de fabricación, [21].

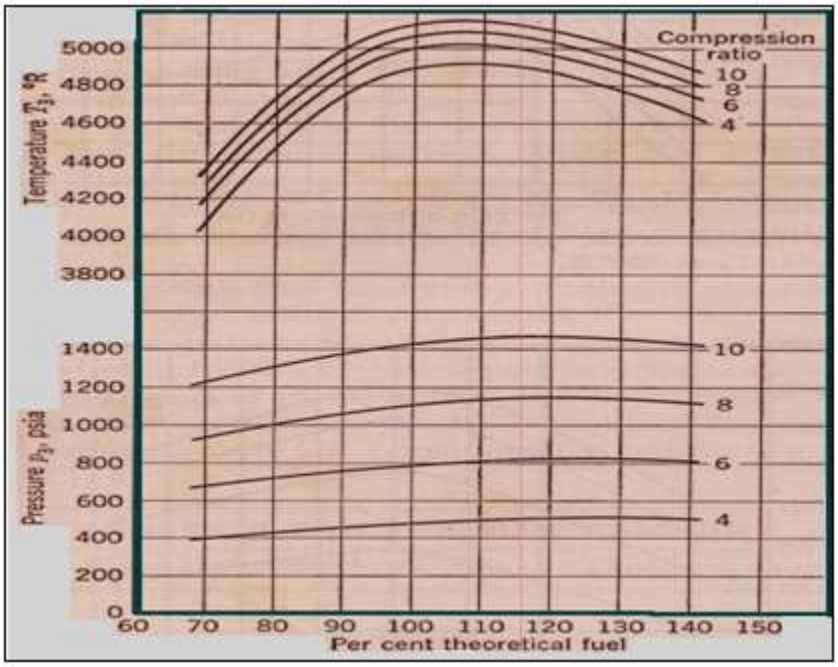



**Figura: 2.21 Efecto de la relación de mezcla y las condiciones $T_3$ y $P_3$**

c) Al considerar el efecto de la temperatura T4 o temperatura de los gases de post-combustión, se observa en la figura 2.22, que dicha temperatura T4 disminuye a medida que aumenta la relación de compresión, debido a la gran expansión de los gases en el cilindro durante el proceso de escape, [21].

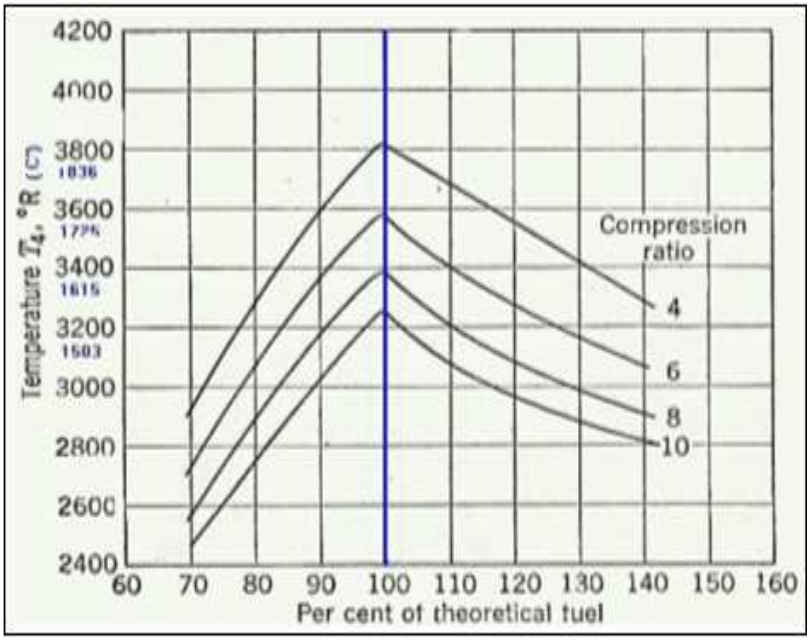



**Figura: 2.22 Efecto de la relación de mezcla sobre la condición T4**

## 2.12. EL GENERADOR ELÉCTRICO

Considerar un generador de electricidad, representa simplemente una unidad generadora de energía eléctrica acoplada a un motor de combustión interna, donde su relevancia dentro del sistema de cogeneración radica de su eficiencia $\eta_g$. Esta se define, como la relación entre la potencia mecánica suplida por el motor, W, y la energía eléctrica desarrollada por el generador, Ge, [21].

$$\eta_g = {}^{Ge}/_{W} \tag{9}$$

Los generadores de última generación están en la capacidad de aprovechar el biogás para la producción de energía eléctrica con un grado de eficiencia del 35%. El grado de eficiencia total de un sistema de cogeneración está en el orden de 85%, [9], [11].

Las características principales que debe tener un motor de biogás que generen energía eléctrica son las siguientes:

- ✓ Larga vida útil operando a cargas máximas.
- ✓ Revoluciones máximas de operacion1800 RPM.
- ✓ Excelente grado mecánico de eficiencia.
- ✓ Rápido disponibilidad de repuestos.
- ✓ Bajo nivel de ruido y emisiones de gases contaminantes.
- ✓ Enfriamiento por agua para que esta sea aprovechable para otros fines.
- ✓ Que pueda operar con biogás con alto contenido de humedad y trazas de otros gases aparte del gas metano.
- ✓ Que no contenga metales corrosibles.

La mayoría de los generadores existentes en el mercado cumplen solo parcialmente estas características. Por esta razón la adquisición de los equipos deben realizarse tratando de que todas estas características se puedan cumplir o aunque sea partes de ellas, [9], [11].

Si se observa el comportamiento de la eficiencia de un generador típico, como se describe la figura 2.23, se aprecia que la eficiencia de los generadores es relativamente estable para las cargas eléctricas parciales que oscilen desde un 55% hasta un 100%. Por lo tanto, el acoplamiento entre un motor reciprocante y un generador eléctrico Constituye una aplicación ideal cuando se ven sometidos a

variaciones de demanda por carga eléctrica, debido que, la eficiencia del generador permanecerá estable y el consumo específico de combustible se comportara igualmente estable, esto permite indicar que la mejor utilización de este conjunto es en operaciones con cargas eléctricas parciales.

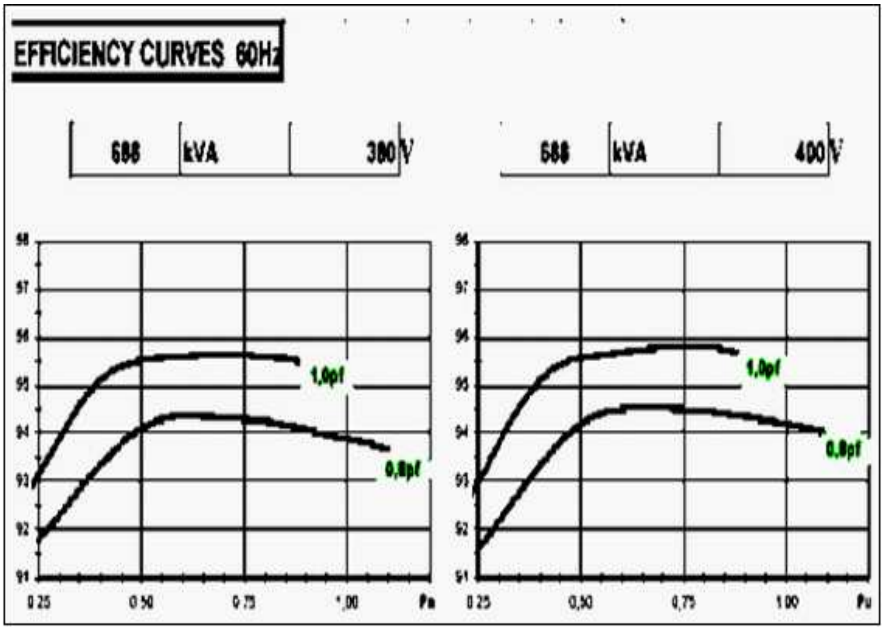



**Figura: 2.23 Curva de Eficiencia del Generador FG Wilson**

## 2.13.MÁQUINA SINCRONA FUNCIONANDO COMO GENERADOR ELECTRICO

Las máquinas síncronas como cualquier otro convertidor electromecánico de la energía, están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética, pudiendo funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor. Sin embargo, en la práctica de las instalaciones eléctricas es más frecuente su empleo como generadores, para producir energía eléctrica de corriente alterna (alternadores) en las centrales eléctricas a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear, [23].

Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación n (r.p.m.) está vinculada rígidamente con la frecuencia f de la red de corriente alterna con la cual trabaja, de acuerdo con la expresión:

$$n = \frac{60f}{p} \tag{10}$$

Donde p es el número de pares de polos de la máquina. Las frecuencias industriales de las tensiones generadas oscilan entre los 50 Hz en Europa y 60 Hz en gran parte de América, [23].

Estos generadores se emplean para la producción de energía eléctrica a pequeña escala acoplados a motores de combustión interna, que se utilizan como equipos de emergencia en hospitales, aeropuertos, salas de ordenadores, centrales telefónicas, etc., que entran en servicio en el momento que falta la tensión de la red. También se aplican estos grupos en el suministro de energía a instalaciones remotas o aisladas, alejadas de las redes de distribución, corno es el caso de ciertas aplicaciones rurales: riegos por aspersión, granjas. Etc., [23].

Como ya se ha indicado antes, las máquinas síncronas son susceptibles de funcionar también convirtiendo la energía eléctrica en mecánica, lo que da lugar al régimen de marcha como motor síncrono. Estos motores se emplean en aquellos accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes, teniendo además la ventaja frente a los motores asíncronos de poder regular simultáneamente el f.p con el cual trabaja, lo que es de gran importancia en cierto tipo de industrias: cemento, metalúrgicas, etc., ya que se evita la colocación de condensadores para reducir la potencia reactiva absorbida por la instalación. Cuando la máquina síncrona trabaja con f.d.p. capacitivo se dice que funciona como compensador o condensador síncrono, [23].

### 2.13.1. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA MAQUINA SINCRONICA

Las máquinas síncronas, al igual que los demás tipos de máquinas eléctricas, están constituidas por dos devanados independientes:

**a)** Un devanado inductor, construido en forma de arrollamiento concentrado o bien distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina, [23].

**b)** Un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna, [23].

En las máquinas pequeñas, para potencias que no superan los 10 kVA, el devanado inductor se coloca normalmente en el estator, en forma concentrada, sobre expansiones magnéticas denominadas polos salientes, estando situado el inducido en el rotor, formando generalmente tres fases, las cuales tienen salida al exterior por medio de tres anillos, como se muestra en la figura 2.24, [23].

En las máquinas síncronas grandes, que para el caso de alternadores pueden llegar a 1.000-1.500 MVA, la colocación de los devanados es inversa a la anterior, de tal forma que los polos quedan situados en el rotor y el devanado trifásico en el estator. En esta situación la estructura del rotor se fabrica en dos versiones distintas, ya sea en forma de polos salientes o en forma de polos lisos o rotor cilíndrico, ver figura 2.25, [23].

**Figura: 2.24 Máquina síncrona de baja potencia con el inducido en el rotor.**

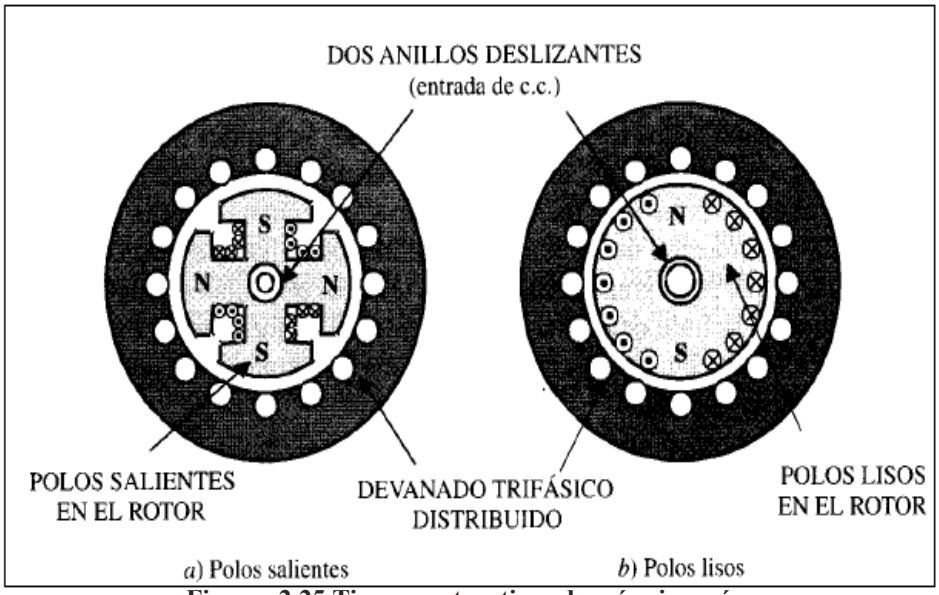



**Figura: 2.25 Tipos constructivos de máquinas síncronas.**

En el primer caso los devanados de los polos son concentrados, mientras que para el rotar cilíndrico el devanado que se coloca en los polos (generalmente 2 o 4 polos) está distribuido en ranuras, cubriendo una parte de la circunferencia del rotar. La alimentación del devanado inductor se realiza por medio de dos anillos colocados en la parte móvil de la máquina por los que se introduce una corriente continua exterior, [23].

La adopción de las formas constructivas indicadas en la figura 2.25 para máquinas de gran potencia presenta diversas ventajas frente a la forma mostrada en la Figura 2.24. Por una parte, un inducido giratorio (figura 2.24) requiere tres anillos (caso de máquinas trifásicas) para recoger la tensión generada y enviarla al circuito exterior; estos anillos deben estar más o menos descubiertos y son difíciles de aislar, especialmente para las tensiones elevadas de 6.600 a 30.000 V a las que funcionan normalmente las máquinas síncronas; además, estos anillos suelen producir perturbaciones debidas a chispas, cortocircuitos, etc.; sin embargo, un inducido fijo (figura 2.25) no necesita anillos y sus conductores pueden llevar un aislamiento continuo desde las espiras hasta las barras del cuadro de salida, [23].

Otro aspecto a considerar dentro de estas máquinas es la diferencia constructiva del rotor en sus dos formas básicas mostradas en la figura 2.25-a, este respecto se puede decir que la elección entre ambos tipos viene impuesta por la velocidad de rotación de la máquina, la cual depende a su vez del tipo de motor primario que la hace girar, y así, se distinguen los turbogeneradores, hidrogeneradores y los generadores diesel (más claramente se diría en estos últimos: generadores acoplados a motores diesel), [23].

### 2.13.2. EL MODELO ELÉCTRICO DE LA MÁQUINA SINCRONICA

En la figura 2.26 se muestran los circuitos equivalentes de secuencia cero para los ejes q y d; de la maquina sincrónica compuesto por una fuente de tensión $V_{0s}$, con una resistencia $r_s$ una inductancia $L_{1s}$ en serie por las cuales circula una corriente $i_{0s}$ , [24].

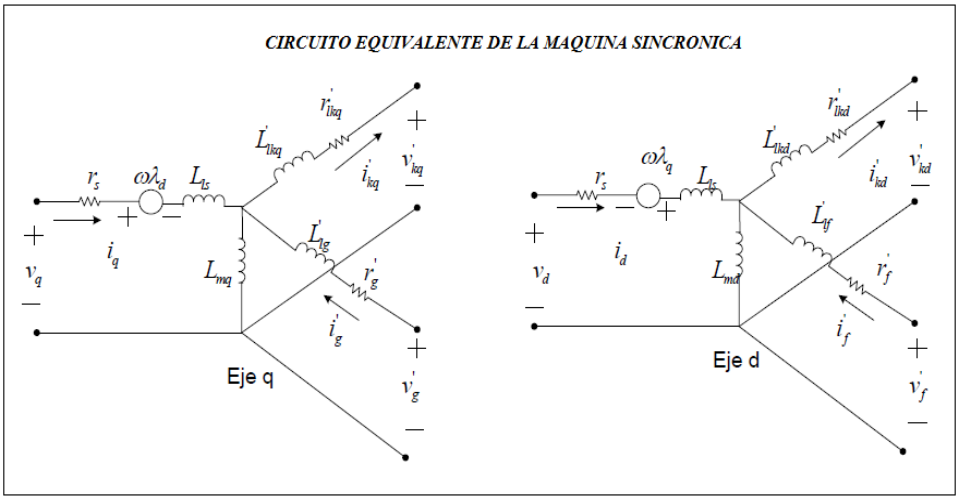



**Figura: 2.26 Circuitos equivalentes de secuencia cero para los ejes q y d de M.S.**

El conjunto de ecuaciones para la máquina síncrona en el marco de referencia del rotor, con las variables del rotor referidas al estator se conoce como las ecuaciones $q_{d0}$ de la máquina síncrona, de manera resumida se muestran a continuación: [24].

$$\begin{aligned} V_q &= r_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_d &= r_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_0 &= r_s i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \end{aligned} \qquad \begin{aligned} V_f' &= r_f' i_f' + \frac{d\lambda_f'}{dt} \\ V_{kd}' &= r_{kd}' i_{kd}' + \frac{d\lambda_{kd}'}{dt} \\ V_g' &= r_g' i_g' + \frac{d\lambda_g'}{dt} \\ V_{kq}' &= r_{kq}' i_{kq}' + \frac{d\lambda_{kq}'}{dt} \end{aligned} \tag{11}$$

Los enlaces de flujo están dados por:

$$\begin{aligned} \lambda_q &= L_q i_q + L_{mq} i_g' + L_{mq} i_{kq}' \\ \lambda_d &= L_d i_d + L_{md} i_g' + L_{md} i_{kd}' \\ \lambda_d &= L_{ls} i_0 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} \lambda_g' &= L_{md} i_d + L_{md} i_{kd}' + L_{ff}' i_g' \\ \lambda_{kd}' &= L_{md} i_d + L_{md} i_g' + L_{kdkd}' i_{kd}' \\ \lambda_f' &= L_{mq} i_q + L_{mq} i_{kq}' + L_{gg}' i_g' \\ \lambda_{kd}' &= L_{mq} i_q + L_{mq} i_g' + L_{kqkq}' i_{kq}' \end{aligned} \tag{12}$$

Donde:

$r_s$: Resistencia de armadura

$r_f$ : Resistencia del devanado del eje $d$

$r_g$ : Resistencia del devanado del eje $q$

$r_{kd}$ : Resistencia del devanado de compensación del eje d

$r_{kq}$ : Resistencia del devanado de compensación del eje q

$L_{ls}$ : Inductancia de fuga de armadura

$L_{lf}$ : Inductancia de fuga del devanado del eje d

$L_{lg}$: Inductancia de fuga del devanado del eje q

$L_{lkd}$: Inductancia de fuga del devanado amortiguador del eje d

$L_{lkq}$: Inductancia de fuga del devanado amortiguador del eje q

$L_{md}$: Inductancia de magnetización del estator en el eje d

$L_{mq}$: Inductancia de magnetización del estator en el eje q

$L_{mf}$: Inductancia del devanadode campo del eje d

$L_{mg}$: Inductancia del devanadode campo del eje q

$L_{mkd}$: Inductancia de magnetización del devanado amortiguador del eje d

$L_{mkq}$: Inductancia de magnetización del devanado amortiguador del eje q

$L_0$ : Autoinductancia promedio del devanado de interés

$s$ : Subíndice que indica que una variable es correspondiente al estator

r : Subíndice que indica que una variable es correspondiente al rotor

$f$ : Subíndice que indica que una variable corresponde al devanado de campo

$l$ : Subíndice que indica que una variable es de dispersión o fuga

$m$: Subíndice que indica que una variable es de acoplamiento mutuo

## GLOSARIO DE TERMINOS

**2.14.1. ANAEROBICO:** Proceso bioquímico o condición ambiental que se sucede en ausencia de oxígeno.

**2.14.2. APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE:** Uso de un recurso natural de modo tal que no altere las posibilidades de su utilización en el futuro

**2.14.3. BIOABONO:** Humus producido por organismos vivos (lombrices, microorganismos) por transformación de materia orgánica.

**2.14.4. BIODEGRADABLE:** Sustancias que pueden ser descompuestas por microorganismos (principalmente bacterias aerobias) en un tiempo corto.

**2.14.5. BIOGAS:** Gas producido por bacterias anaerobias, tiene un alto contenido de metano y es combustible.

**2.14.6. BIOMASA:** Define la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía (bioenergía).

**2.14.7. BIOTECNOLOGÍA:** Es la aplicación de principios científicos y de ingeniería al procesado de materiales mediante agentes biológicos, para la producción de bienes y servicios.

**2.14.8. CAL:** Una caloría es una unidad de energía y representa la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14,5 a 15,5 º C a nivel del mar. Julio = 0,24 cal.

**2.14.9. CARGA DEL DIGESTOR:** Esta indica el volumen de biomasa que se alimenta al sistema o el material que debe ser procesado y la frecuencia.

**2.14.10. COMBUSTIBLES FÓSILES:** Son los constituidos por restos fósiles de organismos vivos. Los principales son: el carbón, el petróleo y el gas natural. Combustibles que derivan de los restos de organismos vivos de eras prehistóricas. Siendo estos carbón, petróleo y gas natural.

**2.14.11. COV:** Es la cantidad de materia orgánica seca (MS) con la que se alimenta diariamente al biodigestor por m3 de volumen de digestor. Se define en Kg de MS por $m^3$ de volumen de digestor (kg /$m^3$).

**2.14.12. CULTIVO ENERGÉTICO:** Se conoce cualquier tipo de cultivo agrario cuya única finalidad sea proporcionar material para destinarlo a su aprovechamiento energético. Los cultivos que suelen labrar con esta finalidad se caracterizan por dos aspectos concretos. Por una parte, por su alta producción por unidad de superficie y año y, por otra, por los pocos requerimientos que exige su cultivo.

**2.14.13. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO):** Es la medida del oxigeno requerido por las bacterias para la oxidación de la materia orgánica presente en las aguas.

**2.14.14. ENERGÍA NO RENOVABLE:** Es la energía proveniente de combustibles fósiles y nucleares. Aportan el mayor porcentaje para la producción de energía eléctrica mundial, aceleran el efecto invernadero y el cambio climático global.

**2.14.15. ENERGÍAS RENOVABLES:** Energías que se producen naturalmente en la Tierra, por acción de fenómenos naturales como el Sol (energía solar o fotovoltaica), los ríos (hidroeléctrica), el viento (eólica), la biomasa, las olas del mar y las mareas o el calor interior de la Tierra (geotérmica). Por su naturaleza estos tipos de energía son inagotables.

**2.14.16. ESTIÉRCOL:** Son las heces fecales de los animales. En general el estiércol posee un contenido de sólidos de 8% a 25%, dependiendo del tipo de animal. Este puede ser mezclado con agua para ser alimentado al digestor en relación de 10 a 1.

**2.14.17. GRADO DE DIGESTIÓN:** Este indica cuánto gas se obtiene en comparación con la producción potencial. La diferencia con el 100% indica qué cantidad de materia orgánica no ha sido procesada. En plantas de biogás sencillas, el grado de digestión alcanza alrededor del 50%. Esto significa que la mitad de residuos orgánicos queda sin aprovechar y salen como fertilizantes en el efluente.

**2.14.18. KWH:** Unidad de energía que equivale a la energía desarrollada por una potencia de un kilovatio (kw) durante una hora. Se usa generalmente para la facturación de energía eléctrica. 1 kwh = 3.600.000 J = 864.000 cal

**2.14.19. LECHO FLUIDIZADO o FLUIDO:** Conjunto de biomasa que se comporta como un fluido al gasificarse. Tecnología utilizada para la combustión de la biomasa que permite utilizar una amplia variedad de combustibles muy heterogéneos con un buen rendimiento.

**2.14.20. MASA DE AGUA:** Cantidad de agua necesaria para mezclar con la materia prima con el fin de obtener la carga diaria al digestor, en las condiciones de mezcla de 10 partes de agua por 1 de sólidos orgánicos.

**2.14.21. MASA ORGÁNICA SECA (SO):** Es el contenido de materia orgánica de un estiércol expresado como masa orgánica seca. Para el proceso de digestión son importantes sólo los componentes orgánicos o volátiles de los residuos orgánicos, por lo tanto se trabaja solamente con la parte orgánica del estiércol.

**2.14.22. MATERIA PRIMA:** Es la totalidad de residuos orgánicos que pueden recolectarse y que pueden ser utilizados para cargar el biodigestor. Esta guía utiliza los términos residuos orgánicos y materia prima para destacar la importancia de considerar este material como un recurso renovable (biomasa).

**2.14.23. PH:** Concentración de iones hidrógeno (H+) o hidróxidos (OH+) que determinan la acidez o basicidad de una sustancia. El pH se mide de 0 a 14 siendo 7 una solución neutra, de 0 a menor de 7 ácida y mayor de 7 a 14 básica. La concentración de CO2 en la carga, la concentración de ácidos volátiles y la propia alcalinidad de la materia prima hacen variar el pH del biodigestor.

**2.14.24. POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS:** Se refiere al volumen de gas teóricamente obtenible de una materia prima, en función de la producción específica y de la cantidad disponible de materia orgánica seca. Aunque el producido no puede juzgarse independientemente de otras variables del proceso.

**2.14.25. PRODUCCIÓN ESPECÍFICA DE GAS:** Es la cantidad de gas medido en m3 que se obtiene de un biodigestor por unidad de masa orgánica seca alimentada al mismo. En la práctica ella indica la producción de gas que se obtiene de una determinada materia prima durante un tiempo de retención dado y a la temperatura de operación del digestor.

**2.14.26. SÓLIDOS TOTALES (ST):** Es el contenido de sólidos totales presentes en un estiércol, orín o material orgánico que se alimenta a un biodigestor, se expresa en porcentaje o peso de sólidos secos.

**2.14.27. TEP:** Toneladas de materia equivalentes en petróleo. Tep = 7,4 barriles de petróleo.

**2.14.28. TIEMPO DE RETENCIÓN (TR):** Es el lapso (en días) durante el cual la carga alimentada permanece en el digestor y es el tiempo necesario para la digestión del material orgánico a la temperatura de operación del digestor. El TR es inversamente proporcional a la temperatura.

# CAPITULO III

# MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se estudia en forma detallada: el tipo de investigación, las fases metodológicas, la unidad de estudio y análisis, las técnicas de recolección de información y el análisis de los datos, aspectos necesarios para el presente trabajo de investigación, de modo que se pueda tener una visión de cómo se llevará a cabo el mismo.

## 3.1. CLASIFICACION DE LA INVESTIGACION

Considerando el texto "Normas Para la Elaboración y Presentación de los Trabajos de Grado de Especialización y de Maestría y las Tesis Doctorales", de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador; se puede clasificar este trabajo de investigación como:

- De **tipo documental**: Se define la investigación documental como el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos. En el presente trabajo, el tema planteado será de carácter innovador, debido a que no se han realizado estudios de factibilidad técnico-económico de la celda de combustible como recurso generador de energía eléctrica en el país, la cual permitirá, profundizar el conocimiento y dar un aporte bibliográfico que sirva de información para futuros trabajos de investigación en esta área.[25]

## 3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS FASES METODÓLOGICAS

### FASE I ESTUDIAR EL POTENCIAL DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DEL BIOGÁS.

**Estrategia a utilizar:** investigación documental y entrevistas con personal especializado en el área de producción animal, como ingenieros agrónomos y zootecnista.

**Actividades:**

A. Estudiar los desechos agropecuarios, considerados como material de carga para la fermentación.

   i. Contenido de masa seca (MS)
   ii. Contenido de masa volátil (MV)
   iii. Demanda química de oxigeno (DQO)
   iv. Demanda bioquímica de oxigeno (DBO)
   v. Relación carbono-nitrógeno (C:N)
   vi. Bio-degradabilidad de desechos orgánicos.

B. Estudiar las características que definen la biomasa.

C. Estudiar la cantidad de biogás producido por los desechos agropecuarios seleccionados.

D. Evaluar la calidad del biogás producido.

**FASE II EVALUAR DIFERENTES TIPOS DE BIODIGESTORES EXISTENTES EN EL MERCADO, ASÍ COMO PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA ESTABLECER LOS CRITERIOS DE DISEÑO.**

**Estrategia a utilizar:** investigación documental en libros, revistas técnicas y catálogos.

**Actividades:**

A. Conceptualizar el Biodigestor, definiendo su estructura típica y su clasificación.
B. Establecer los tipos de biodigestores existentes en el mercado.
C. Establecer los mecanismos de operación del Biodigestor.

**FASE III DIMENSIONAR LA PLANTA DE BIOGAS Y SUS ESTRUCTURAS**

**Estrategia a utilizar:** investigación documental en libros, revistas técnicas; además de entrevistas a personal especializado en la materia.

**Actividades**

A. Establecer las dimensiones de las estructuras que conforman la planta de generación de potencia a través del aprovechamiento de la biomasa disponible. A continuación se establecen las estructuras a ser dimensionadas.

i. Tanque de alimentación.
ii. Sistema de alimentación.
iii. Digestor.
iv. Lecho de secado.
v. Tuberías de captación y conducción de biogás.
vi. Sistema de purificación de biogás.

vii. Tanques de almacenamiento de biogás.
viii. Sistema de generación de energía eléctrica y calorífica.
ix. Antorchas.

**FASE IV DISEÑAR LA PLANTA DE GENERACIÓN DE POTENCIA A TRAVÉS DEL SOFTWARE BioDigestor©, A FIN DE CARACTERIZAR EL DISEÑO DE LA PLANTA**

**Estrategia a utilizar:** Estudiar a fondo cómo se realizan las simulaciones en el software BioDigestor©, a través de libros y tutoriales, ya sean disponibles en la red o de otras fuentes bibliográficas, para poder llevar a cabo la modelación correcta.

**Actividades:**

A. Instalación efectiva del software.

B. Construcción del modelo de la planta de generación de potencia.

C. Una vez construido el modelo en el software, se procederá a introducir y/o ajustar los parámetros seleccionados, correspondientes a la planta.

D. Obtención de resultados. En el caso particular de esta investigación, la información que se extrae de la simulación es la siguiente.

i. Dimensionamiento y diseño esquemático de todas las estructuras de la planta.
ii. Calculo de la producción de biogás, energía eléctrica y equivalencias energéticas.

**FASE V DIMENSIONAR Y SELECCIONAR EL GENERADOR DE POTENCIA ELECTRICA.**

**Estrategia a utilizar:** Investigación de catálogos de los sistemas motor-generador disponibles en el mercado, para producción de energía eléctrica a través de biogás.

**Actividades:**

A. Estimar la producción de biogás.

B. Establecer el porcentaje de gas metano contenido en el biogás.

C. Establecer la cantidad de gas metano producido por día.

D. Determinar la eficiencia de producción de energía eléctrica del sistema motor-generador.

E. Calculo de la potencia del sistema motor-generador a instalar.

F. Selección del sistema motogenerador a instalar.

**FASE VI SIMULAR UTILIZANDO MATLAB®-SIMULINK, EL PAR MOTOR GENERADO, A FIN DE CARACTERIZAR SU COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO.**

Estrategia a utilizar: **estudiar a fondo como se realiza las simulaciones en el software matlab® simulink a través de libros y tutoriales, ya sean disponibles en la red o de otras fuentes bibliográficas, para poder llevar a cabo la modelación correcta**.

**Actividades**

A. Construcción del modelo del Motor de Ciclo Otto.

B. Consideraciones del modelo matemático de la maquina sincrónica

C. Una vez construido el modelo en el software matlab®simulink, se procederá a introducir y/o ajustar los parámetros correspondientes del motor y el generador.

   i. Introducción de los parámetros del motor
   ii. Introducción de los parámetros de la maquina sincrónica

D. Obtención de resultados. En el caso particular de esta investigación, la información que se extrae de la simulación es la siguiente.

   i. Graficas de todas las variables eléctricas que permitan establecer el rendimiento, niveles de tensión, corriente y potencia requeridos para la alimentación del sistema.

## FASE VII SELECCIONAR LOS EQUIPOS QUE COMPONEN LA PLANTA DE BIOGAS

**Estrategia a utilizar:** Investigación mediante revisión de catálogos de fabricantes y páginas web especializadas, de los distintos equipos disponibles en el mercado, necesarios para instalar la planta de biogas.

**Actividades**

A. Selección de los equipos que forman parte de las estructuras dimensionadas en la fase III, los cuales se mencionan a continuación.

   i. Agitadores del tanque de biodigestion
   ii. Mezclador del tanque de alimentación
   iii. Tuberías de alimentación y descarga de la planta de biogas
   iv. Filtros de limpieza biogas Biolimp Siloxa
   v. Gasómetro
   vi. Bomba de descarga de biol
   vii. Bomba de descarga de lodos

## 3.3. UNIDAD DE ESTUDIO Y ANÁLISIS

La unidad de análisis se refiere al "qué o quién" es objeto de interés en un estudio, quizás lo anterior parezca muy obvio, aunque en la práctica no es tan sencillo, ya que muchas propuestas de investigación o trabajos de grado no logran una coherencia entre los objetivos planteados y la unidad de análisis.

**Unidad de Análisis:** Como el objetivo de la investigación consiste en establecer los fundamentos básicos para el diseño de una planta de generación de potencia eléctrica a través del aprovechamiento de la biomasa disponible en zonas pecuarias de Venezuela, se establece como unidad de análisis la planta de generación de potencia eléctrica.

**Población:** Es el conjunto de elementos o individuos objeto de estudio. La población está conformada por las características del biogás generado a través de los desechos agropecuarios característicos de las zonas pecuarias de Venezuela.

**Muestra:** Las muestras son en esencia un subgrupo de la población y se utilizan para economizar tiempo y recursos. El tipo de muestra seleccionado para este estudio es la muestra "no probabilística" o muestra dirigida.

Aunque con la muestra no probabilística no se puede hacer inferencia sobre toda la población definida; se selecciona para este estudio por las siguientes razones:

- Recoge controladamente la información de empresas con características específicas, en vez de buscar información para obtener la representación de todas las empresas o industrias de la población definida sin considerar el tipo de proceso productivo.
- Razones prácticas de aplicación en el tiempo de investigación y de recursos.
- Por ser un estudio descriptivo el objetivo es definir qué se va a medir y cómo se logrará la precisión en la simulación digital de la planta de generación de energía eléctrica para la zona.

## 3.4. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN, INTERPRETACIÓN Y PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN.

### 3.4.1. INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Los elementos indispensables para la aplicación efectiva de una muestra de aspectos que son considerados en la presente investigación, a juzgar por Hernández Sampiero, Fernández, Baptista (1999), son los siguientes:

A. Listar las variables que se pretenden medir.

B. Revisar su definición conceptual y comprender su significado.

C. Revisar las definiciones operacionales de las variables.

D. Elegir un instrumento que haya sido favorecido por la comparación y adaptarlo al contexto de esta investigación.

E. Seleccionar el nivel de medición de cada ítem.

F. Realizar los ajustes y mejoras para verificar la confiabilidad y validez de los instrumentos.

Además, se empleará una serie de técnicas de recolección de la información, orientadas de manera esencial a alcanzar los fines propuestos. Las técnicas utilizadas para recopilar la información serán las siguientes:

**Técnicas Documentales**: a partir de la observación documental, como punto de partida para la presente investigación, se realizará un análisis de fuentes documentales, mediante lectura general de textos relacionados con el tema y otros aspectos técnicos, que son fundamentales en el desarrollo de planteamientos esenciales y aspectos lógicos de su contenido, con el propósito de extraer algunos datos bibliográficos útiles para el estudio que se está realizando. Estas técnicas también aplican a la búsqueda de la información por Internet para artículos referentes al tema de investigación, definiciones, bibliografías acerca de trabajos similares, y trabajos especiales de grado y postgrado, desarrollados en la Universidad de Carabobo y en otras universidades.

**Entrevistas:** Con profesionales expertos en el manejo y producción de biogás a través de desechos agropecuarios para recolectar la información.

## 3.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS.

Tal como lo refiere Selltiz, Jahode y Otros (1976), "*El propósito del análisis es resumir las observaciones llevadas a cabo de tal forma, que proporcionará respuestas a las interrogantes de investigación".*

### 3.5.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

La información recabada es analizada de acuerdo a las exigencias de cada fase metodológica, la misma se organizará para dar respuesta a los objetivos planteados en el estudio, conectándolos con las bases teóricas que sustentan la misma, así como con los conocimientos que se disponen con relación al problema abordado. Los datos serán analizados a través de simulaciones y modelos matemáticos.

Los planos de todas las estructuras que conforman la planta se realizaran con el programa **AutoCad 2008** ®, además, por ser un programa de fácil manejo y estar orientado a la elaboración de planos cuenta con recursos tradicionales del grafismo en el dibujo, como color, grosos de líneas y texturas tramadas. La información suministrada por la empresa se analiza utilizando Microsoft Office Excel 2007, de la cual se extraen los gráficos y cálculos matemáticos necesarios para construir tablas de valores.

### 3.5.2 PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se realiza la descripción de los resultados obtenidos de cada variable mediante tablas, gráficos, diagramas y/o cuadros, con un respectivo análisis para la fácil comprensión e interpretación de los resultados obtenidos en cada ítem.

# CAPITULO IV

# ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS DATOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos del análisis de los datos recopilados durante el transcurso de la presente investigación.

## 4. DESARROLLO DE LAS FASES METODOLOGICAS

## FASE I ESTUDIAR EL POTENCIAL DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DEL BIOGÁS.

### 4.1.1. Conceptualizar los análisis físico-químicos que deben realizarse a la biomasa que se está considerando como material de carga, a fin de evaluar su potencial para producir biogás

Las características importantes que se consideran en la biomasa para su aprovechamiento en el Biodigestor, atendiendo a recomendaciones de la bibliografía consultada son las siguientes:

#### 4.1.1.1. Materia seca y contenido de Sólidos Totales (ST)

Se considera la materia seca; al contenido seco de biomasa contenido en un residuo. Esta es la parte seca y sin humedad del material de carga considerado como residuo. El contenido de masa seca determina la cantidad de agua que debe adicionarse a la biomasa previa alimentación del Biodigestor, [26].

Para la determinación de la materia seca se utiliza el siguiente procedimiento descrito en la metodología propuesta en Standard Methods APHA, (1985).

Se toma una muestra, se pesa la misma y se seca a 105 °C en un horno durante 48 horas.

$$Humedad(\%) = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} * 100 \quad (13)$$

Donde:

$P_1$: Peso de la muestra inicial en gramos.

$P_2$: Peso después de secado en gramos.

Con lo anterior tenemos la siguiente expresión:

$$\text{Masa seca } (\%) = 100\% - \text{Humedad } (\%) \quad (14)$$

Toda materia orgánica residual que se define como material de carga para el Biodigestor, generalmente está compuesta por una importante cantidad de agua y una fracción sólida caracterizada por la concentración de sólidos totales (ST).

Es necesario el volumen de agua para diluir la materia prima, hasta la proporción adecuada, de acuerdo al contenido de sólidos del residuo a utilizar.

#### 4.1.1.2. Contenido de Masa Volátil (MV)

Se conoce como masa volátil (MV); al contenido de cenizas que se obtienen de una muestra, después de la incineración de la materia seca durante 6 horas a 550°C. El secado debe realizarse en un horno, [26].

El contenido de masa volátil se calcula de la siguiente expresión:

$$MV\ (\%) = \frac{MS(gr) - Ceniza(gr)}{MS(gr)} * 100 \quad (15)$$

El conocimiento de la masa volátil es importante, ya que solo este porcentaje es el contenido real de masa orgánica de la biomasa. Este contenido de MV es el que produce biogás durante la digestión anaeróbica en el Biodigestor.

Este valor también es necesario, para el cálculo de la carga orgánica volumétrica (COV).

#### 4.1.1.3. Demanda química de oxigeno (DQO)

La demanda química de oxigeno es la cantidad total de oxigeno en unidades de $^{mg}/_{l}$ necesarios para oxidar completamente las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un litro de suspensión y se emplea como medida directa de la cantidad de sustrato transformable a biogás, [28].

Por el principio de la conservación de la materia la cantidad eliminada de demanda química de oxigeno (DQO), (medida indirecta de la concentración de materia orgánica del residuo), se convierte en gases. A través de este principio, en condiciones normales de presión y temperatura, se considera que la cantidad de metano producido es de:

$$CH_{4\,Prod} = \frac{CH_4(m^3)}{DQO_{eliminado}(kg)} \quad (16)$$

#### 4.1.1.4. Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5)

Otro parámetro de la digestibilidad de los residuos es la demanda biológica de oxigeno (DBO5) que es el consumo de oxigeno, en $^{mg}/_{l}$ de suspensión, durante la degradación por microorganismos durante  días a 20°C, [28].

Tanto la DBO como la DQO son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la primera es la más representativa de la degradabilidad de la misma. También puede usarse el valor del carbono orgánico total (COT) el cual se obtiene midiendo el $CO_2$; formado en la combustión.

#### 4.1.1.5. Relación Carbono Nitrógeno (C:N)

Para que los procesos anaeróbicos se desarrollen y la flora microbiana actué es necesario, que la materia orgánica contenga una cierta cantidad de nutrientes. El consumo de carbono (C) es superior al del nitrógeno (N), en forma amoniacal, en una relación de $\frac{C}{N} = \frac{30}{1}$ ; cuando la relación es muy estrecha ($\frac{10}{1}$), hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Si hay demasiado carbono en la materia a fermentar, el proceso se hace más lento y tiende a acidificarse. Si hay demasiado nitrógeno, éste se perderá como amoniaco, elevando el pH y reduciendo el poder fertilizante y nutriente de los lodos efluentes. También se requieren de una cantidad de fosforo en una proporción de $\frac{N}{P} = \frac{5}{1}$. Además, deben estar presentes metales alcalinos y alcalinos térreos, como sodio, potasio, calcio y magnesio en pequeñas concentraciones como micronutrientes; de lo contrario, pueden ser causa de la inhibición del proceso de digestión. Para cumplir con las funciones enzimáticas también se requiere de pequeñas concentraciones de hierro, cobre, zinc, azufre, etc., los que se encuentran en las cantidades necesarias, en todos los residuos orgánicos habitualmente utilizados, [29].

La relación ideal de nutrientes se expresa en las ecuaciones que se presentan a continuación:

C: N: P =75:5:1 hasta 125:5:1

C: N = 10:1 hasta 30:1

N: P = 5:1

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a la fermentación anaeróbica. La cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células. Los alimentos principales de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en forma de proteínas, nitratos, amoniaco, etc.), [29].

El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno, para la construcción de estructuras celulares. Las bacterias utilizan carbono con una rapidez de unas treinta veces más, que el uso de nitrógeno. Si la relación C:N es alta, el nitrógeno será consumido rápidamente por las bacterias metanogénicas para formar proteínas y no reaccionara con el material restante, por tanto, la producción de gas será lenta. Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitada. Al existir nitrógeno en exceso se produce amoniaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso, [29].

Debido a estas características de la relación C:N, muchas veces es necesaria la co-generación o mezcla de diferentes tipos de biomasa con diferentes relación C:N para aumentar o reducir a un valor más cercano al óptimo. Los materiales con una relación C:N alta pueden mezclarse con aquellos que presentan una relación C:N baja, para dar la relación promedio deseada a la carga, que es de 20 a 30 partes de carbono por una de nitrógeno, [29].

#### 4.1.1.6. Biodegradabilidad de Desechos Orgánicos

La determinación de la biodegradabilidad de un tipo de afluente agroindustrial permite estimar la fracción de DQO que puede ser eliminada por medio de la digestión anaeróbica. La relación entre los valores de DBO y DQO es indicativa de la

biodegradabilidad de la materia orgánica. En el caso de aguas residuales o aguas de procesos, estas pueden degradarse en un Biodigestor, cuando la relación $\frac{DBO}{DQO} \geq 0{,}5$. Se puede establecer que una relación $\frac{DBO}{DQO} = 0.5$ denota un grado satisfactorio de biodegradabilidad. Una relación de $\frac{\text{DBO}}{\text{DQO}}$ inferior a 0.5; admite la presencia de sustancias tóxicas que retardan o inhiben la biodegradabilidad (metales pesados, cianuros, cloro, etc.) aun en presencia de sustancias carbonadas, resistentes ellas mismas a la descomposición biológica. Un valor de la relación $\frac{\text{DBO}}{\text{DQO}}$ menor de 0,2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y orgánico si es mayor de 0,5. [27]

#### 4.1.1.7. Procedimiento de laboratorio de los análisis antes mencionados

**Análisis químico:** Para establecer el grado de contaminación ambiental de los desechos líquidos se evaluara el parámetro Demanda Química de Oxigeno (DQO), que mide la cantidad de materia orgánica presente en el efluente, siendo esta una expresión del poder polucional de un agua. [3]

**Demanda Química de Oxigeno (DQO):** Se tomaran muestras a la entrada y a la salida del reactor una vez cumplido los tiempos de retención aplicados. Estas muestras se colocaran en recipientes de vidrios de capacidad de 300 ml y se neutralizaran con acido sulfúrico ($H_2SO_4$), para evitar el posterior desarrollo y crecimiento de la flora bacteriana en dicho efluente y afluente.

El procedimiento para la determinación de la Demanda Química de Oxigeno (DQO) es el método de flujo abierto del Standard Methods For The Examination Of Water And Wastemater adaptado por la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela.

Para ello se requieren los siguientes equipos y reactivos:

- Condensador de reflujo abierto o cerrado con sus respectivas fiolas de 250 ml
- Cocina térmica o manta de calentamiento, agitador electromagnético
- Solución valorada de sulfato ferroso amoniacal 0.25 N
- Solución valorada de Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 0.25 N
- Solución de Acido Sulfúrico
- Solución estandarizada de Dicromato de potasio
- Sulfato de mercurio
- Acido Sulfamico
- Solución indicador Ferroin
- Cristalería (Beakers, Cilindro graduado, Pipetas, etc.)

Para calcular el porcentaje de reducción de la DQO, aplicamos la siguiente ecuación general:

$$\text{Reduccion DQO } (\%) = \frac{\text{DQO}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)_{\text{entrada}}} - \text{DQO}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)_{\text{salida}}}}{\text{DQO}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)_{\text{entrada}}}} * 100 \qquad (17)$$

**Análisis Físico:** Para mejorar la interpretación del grado de contaminación ambiental de despojos líquidos se evaluaran como parámetros complementarios: Los Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos (SF) y Sólidos Volátiles (SV).

Mijares (1978), asegura que la materia sólida presente en los líquidos residuales permite predecir en base a la eficiencia de las distintas etapas de tratamiento que se estimen como necesarias, el mayor o menor grado de purificación esperado, [4].

Y el contenido de sólidos de un agua afecta directamente la cantidad de lodo que se produce en el sistema de tratamiento o reactor, [5].

**Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos (SF) y Sólidos Volátiles (SV)**: Se tomaran alícuotas de las muestras seleccionadas para determinar la DQO, el funcionamiento para determinar los sólidos se basa en el Método Gravimétrico.

En el cual se consideran Sólidos Totales de un agua el residuo de la evaporación y secado a 103 – 105°C. Los Sólidos Fijos el residuo de secado y evaporación a temperaturas de 500 + ó – 50°C, y los Sólidos Volátiles considera como la diferencia de los Totales y los Fijos. [5]

Para ello se requieren los siguientes equipos:

- Estufa
- Mufla
- Crisoles
- Balanza analítica
- Cilindro graduado, pipetas, etc.
- Pinzas

Para calcular el porcentaje de reducción de sólidos, aplicamos la siguiente ecuación general:

$$\text{Reduccion Solidos}(\%) = \frac{\text{Solidos}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)_{\text{entrada}}} - \text{Solidos}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)_{\text{salida}}}}{\text{Solidos}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)_{\text{entrada}}}} * 100 \qquad (18)$$

**Análisis fisicoquímicos a las muestras**

Los análisis realizados en el laboratorio de la PTAR, fueron:

- **Sólidos suspendidos (SS);** obtenidos con base en el peso seco de los residuos que resultan de evaporar las muestras de aguas colocadas en la estufa a 103 ± 5ºC por 30".

- **Sólidos Volátiles (SV);** obtenidos con base en el peso seco de la muestra final de los sólidos suspendidos que resultan de incinerar las muestras en mufla a 590 ± 10ºC por 15".

- **Sólidos Fijos (SF);** resulta de la diferencia entre los sólidos suspendidos y volátiles usando método gravimétrico.

- **Demanda Química de Oxigeno** (**DQO);** se emplea para medir el contenido de materia orgánica, el método se basa en la oxidación de la materia orgánica contenida en la muestra utilizando dicromato de potasio 0.25N, como oxidante en presencia de ácido sulfúrico concentrado a 98-99% e iones de hierro como catalizador. La disolución acuosa se calienta durante 2 h a 148 ºC, luego es valorada por titulación con sulfato ferroso amoniacal 0,1 N este método se denomina oxidación al dicromato - reflujo abierto.

- **Demanda biológica de oxígeno (DBO);** determina la cantidad de oxigeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. El fundamento del método, consiste en medir la cantidad de O2 disuelto en un medio de incubación al comienzo y al final de un período de 5 días, durante el cual la muestra es mantenida al abrigo del aire, a 20° C, y en la oscuridad para inhibir la eventual formación de O2 por las algas.

El método se basa en nutrir la muestra con agua saturada de oxigeno y enriquecerla a través de una solución nutritiva compuesta por buffer de fosfato, sulfato de de magnesio, cloruro de calcio y férrico; se le agregan el reactivo de azida y el sulfato de manganeso y se colocan en oscuridad por 10" a 20ºC; luego de la formación del precipitado color marrón se procede a diluir con acido sulfúrico y a valorar con tiosulfato de sodio 0.025N a todas aquellas muestras de medición inicial, las de medición final se esperan 5 días y se realizan los mismos pasos para medir la cantidad de oxigeno final demandado por los microorganismos para degradar la materia orgánica todos realizados bajo la metodología de diluciones continuas del Standard Methods [1].

**4.1.2. Analizar los diferentes tipos de desechos agropecuarias, considerados como material de carga o sustrato; a fin de evaluar la cantidad de biogás que producen considerando las pruebas físico-químicas antes mencionados.**

En el estudio del biogás producido por los diferentes tipos de desechos agropecuarios se considera para el caso de esta investigación, una recopilación de información internacional realizados en Europa y América latina donde se han diseñado y construido biodigestores, con igual material de carga; ya que dicho sustrato no contiene muchas variaciones, y se podrían manejar como tipo estándar.

En consecuencia; a continuación se presenta una descripción de los diferentes tipos de desechos agropecuarios; presentados en una serie de información tabulada.

En función de lo antes descrito se presenta en el cuadro 4.1, con valores promedio que suelen utilizarse en varios países y en distintas zonas climatológicas.

**Cuadro 4.1 Producción de biogás y nutrientes - Valores referenciales**

| SUSTRATO | MS (%) | MV (%) | BIOGÁS (m3/kg MV) | CH4 (%) | METANO (lN/kg MV) | N | P2O5 | K2O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ESTIÉRCOL DE GANADO CON RESTOS DE PIENSO | 12 | 84 | 370 | 55 | 204 | 3,5 | 1,7 | 6,3 |
| ESTIÉRCOL DE GANADO SIN RESTOS DE PIENSO | 9 | 80 | 280 | 55 | 154 | 3,3 | 1,6 | 5,9 |
| PURÍN DE CERDO | 6 | 80 | 400 | 60 | 240 | 3,6 | 2,5 | 2,4 |
| MAJADA DE GANADO | 25 | 80 | 450 | 55 | 248 | 4 | 3,2 | 8,8 |
| GALLINAZA SECA | 35 | 75 | 500 | 65 | 325 | 18,4 | 14,3 | 13,5 |
| ESTIÉRCOL DE CABALLO SIN PAJA O PIENSO | 26 | 75 | 300 | 55 | 164 | - | - | - |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

En el cuadro 4.2 se muestran las características físicas químicas de varios desechos animales y la correspondiente producción de biogás. Estos valores se utilizan generalmente para el diseño de digestores en países europeos. La tabla es basada en la producción de estiércol en base a la UAE (unidad animal equivalente). Dichos valores sirven de referencia cuando no se tienen datos reales en un proyecto.

**Cuadro 4.2 Producción de biogás - excremento de animales**

| SUSTRATO | MS (%) | MV (%) | ESTIÉRCOL ($m^3$/UAE) | BIOGÁS ($m^3$/kgMV) | BIOGÁS ($m^3$/UAE*d) | BIOGÁS ($m^3CH4$/kgMV) | $CH_4$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CABALLO - MAJADA (MENOS DE 3 AÑOS) | 28 | 75 | 8$m^3$ | 0,58 | 2 | 0,36 | 62 |
| CABALLO MAJADA (MAYORES A 3 AÑOS) | 28 | 75 | 11$m^3$ | 0,58 | 2,8 | 0,36 | 62 |
| VACAS LECHERAS – ESTIÉRCOL | 8 | 83 | 22$m^3$ | 0,25-0,40 | 1,5 | 0,23 | 57 |
| VACAS LECHERAS – MAJADA | 25 | 83 | 15$m^3$ | 0,40 | 2,7 | 0,25 | 57 |
| VACAS PURÍN | 7,50 | 83 | 16$m^3$ | 0,30-0,40 | 1 | 0,24 | 57 |
| TERNERAS HASTA 4 MESES- MAJADA | 25 | 83 | 12$m^3$ | 0,4 | 2 | 0,25 | 63 |
| OVEJAS-MAJADA | 28 | 83 | 6$m^3$ | 0,73 | 2,3 | 0,45 | 62 |
| CERDAS CON CRÍA- PURÍN | 7 | 80 | 22$m^3$ | 0,30-0,50 | 1,4 | 0,3 | 60 |
| CERDOS ENGORDE-MAJADA | 23 | 83 | 11$m^3$ | 0,50-0,62 | 2,9 | 0,4 | 60 |
| CERDOS ENGORDE-PURÍN | 6 | 80 | 19$m^3$ | 0,30-0,50 | 1,3 | 0,35 | 60 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

Tomando en consideración, que una unidad animal equivalente (UAE) representa un animal con peso equivalente a 500 kg.

En los cuadros 4.3, 4.4 y 4.5 se establecen la producción de estiércol y los correspondientes %MS, MV y N para varios tipos de animal. Estos valores se utilizan en proyectos de biogás que se realizaron en Australia, al igual que la tabla anterior también pueden ser utilizados para el diseño de digestores.

**Cuadro 4.3 producción anual de estiércol (kg/PVA.a) y % de MS-MV y N**

| TIPO DE ANIMAL | ESTIÉRCOL POR AÑO kg/a | MS | | MV | | N | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | kg/a | (%) | kg/a | (%) | kg/a | (%) |
| VACAS | 16100 | 1850 | 11,6 | 1400 | 8,7 | 77 | 0,5 |
| CERDOS | 13500 | 1130 | 8,4 | 900 | 6,7 | 102 | 0,8 |
| POLLOS-GALLINAZA FRESCA | 18250 | 4020 | 22 | 3170 | 17,4 | 232 | 1,3 |
| POLLOS-GALLINAZA SECA | 4230 | 3390 | 80 | 2560 | 60 | 146 | 3,5 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

**Cuadro 4.4: Producción anual (kg/pva.a) y porcentajes**

| TIPO DE ANIMAL | P2O5 | | K2O | | RELACIÓN DE NUTRIENTES (P2O5=1) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kg/a | (%) | kg/a | (%) | N | P2O5 | K2O |
| VACAS | 34 | 0.2 | 84 | 0,5 | 2,3 | 1 | 2,5 |
| CERDOS | 56 | 0,4 | 35 | 0,3 | 1,8 | 1 | 0,6 |
| POLLOS-GALLINAZA FRESCA | 194 | 1 | 108 | 0,6 | 1,2 | 1 | 0,6 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

**Cuadro 4.5 Producción de estiércol y Biogás por animal**

| TIPO DE ANIMAL | PESO DEL ANIMAL (kg) | PRODUCCIÓN DE EXCREMENTOS | | EXCREMENTOS RECOLECTADOS (kg/animal) | PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS (m3/animal) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | DIARIO (kg/d) | ANUAL (kg/animal) | | |
| CERDOS | 50 | 6 | 2190 | 1752 | 0,18-0,25 |
| TOROS | 500 | 34 | 12410 | 9928 | 0,36-0,96 |
| CABALLOS | 500 | 10 | 3650 | 2920 | |
| OVEJAS | 15 | 1,5 | 548 | 438,4 | |
| POLLOS | 1,5 | 0,1 | 36,8 | 29,44 | 0,0076-0,0112 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

Cuando no se tiene datos reales sobre la producción de estiércol de diferentes animales es conveniente realizar el cálculo de la producción de biomasa en base al peso promedio de cada animal. Generalmente esta estimación se basa en la producción de estiércol de 100 o 1000 kg de peso vivo de animal. El cuadro 4.6 nos muestra las características físico químicas del estiércol de un animal bajo las consideraciones de peso antes establecidas.

**Cuadro 4.6 Características físico químicas de excrementos Animales calculadas para animales en (kg/100kg.PVA.d)**

| TIPOS DE ANIMAL | PESO HÚMEDO | SALIDOS TOTALES | SÓLIDOS VOLÁTILES | N° TOTAL |
|---|---|---|---|---|
| BOVINOS DE CARNE | 4,6 | 0,7 | 0,65 | 0,055 |
| CERDOS | 5,1 | 0,69 | 0,57 | 0,039 |
| GALLINAS PONEDORAS | 6,6 | 1,67 | 1,22 | 0,099 |
| OVINOS | 3,6 | 1,07 | 0,91 | 0,043 |
| VACAS LECHERAS | 9,4 | 0,89 | 0,72 | 0,036 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

En el cuadro 4.7 se exponen los resultados de un análisis físico-químico realizado para determinar los parámetros físicos químicos del estiércol de cerdo, ganado vacuno y gallinaza, además exponen los porcentajes promedio de MS y MV, así como el contenido de nutrientes de estos desechos.

**Cuadro 4.7 Características físico químicas promedio de estiércol de animales**

| SUSTRATO | MS (%) | MV (%MS) | N | NH4 | P2O3 | K2O | MG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ESTIÉRCOL DE GANADO | 8-11 | 75-82 | 2,6-6,7 | 1,0-4 | 0,5-3,3 | 5,5-10 | 0,3-0,7 |
| PURÍN DE CERDO | 7 | 75-86 | 6,0-18,0 | 3,0-17 | 2,0-10 | 3-7,5 | 0,6-1,5 |
| MAJADA DE GANADO | 25 | 68-76 | 1,1-3,4 | 0,22-2 | 1,0 -1,5 | 2,0-5 | 1,3 |
| ESTIÉRCOL DE CERDO | 20-25 | 75-80 | 2,6-5,2 | 0,9-1,8 | 2,3-2,8 | 2,5-3 | - |
| GALLINAZA | 32 | 63-80 | 5,4 | 0,39 | - | - | - |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

En el cuadro 4.8 se exponen las producciones de biogás para diferentes tipos de animales, pero basados en el peso vivo de cada animal. Estos valores son usados en Europa.

**Cuadro 4.8 Producción de estiércol y biogás para diferentes tipos de animal en base al peso**

| TIPO DE ANIMAL | PATOS | POLLOS ENGORDE | GALLINAS PONEDORAS | CERDOS | PAVOS | CABALLOS | OVEJAS | TOROS | VACAS | TERNERAS | UNID |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL** | | | | | | | | | | | |
| PESO VIVO POR ANIMAL | 0,03 | 2 | 2 | 70 | 8 | 400 | 60 | 550 | 520 | 40 | kg |
| TOTAL | 0.33 | 0,19 | 0,13 | 5,88 | 0,38 | 20,4 | 2,4 | 29 | 43 | 2,48 | kg/d |
| MS | 0,09 | 0,05 | 0,03 | 0,77 | 0,1 | 6 | 0.66 | 4,25 | 6 | 0,21 | kg/d |
| MV | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,6 | 0,07 | 4 | 0,55 | 3,6 | 5 | 0,09 | kg/d |
| TOTAL ESTIÉRCOL kg/d | 0,11 | 0,085 | 0,064 | 0,084 | 0,047 | 0,051 | 0,04 | 0,058 | 0,086 | 0,062 | kg/kg peso vivo del animal por día |
| PRODUCCIÓN DE BIOGÁS | 0,027 | 0,017 | 0,011 | 0,334 | 0,033 | 1,62 | 0,198 | 1,46 | 1,1 | 0,023 | m3/d |
| PRODUCCIÓN DE ENERGÍA | 0,007 | 0,005 | 0,003 | 0,09 | 0,009 | 0,44 | 0,054 | 0,42 | 0,34 | 0,006 | Kw |
| BIOGÁS / kg ESTIÉRCOL | 81,04 | 89,43 | 86,09 | 56,77 | 87,86 | 79,44 | 82,28 | 53,91 | 28,91 | 9,29 | l/kg.d |
| BIOGÁS / kg ANIMAL | 8,91 | 7,6 | 5,51 | 4,77 | 4,13 | 4,05 | 3,29 | 33,13 | 2,49 | 0,58 | l/kg.d |
| **CANTIDADES DE ANIMALES EQUIVALENTES POR EJEMPLO 12,48 PATOS=1CERDO** | | | | | | | | | | | |
| PATOS | 1 | 0,63 | 0,41 | 12,48 | 1,24 | 60,59 | 7,38 | 58,46 | 46,49 | 0,86 | - |
| POLLOS | 1,6 | 1 | 0,66 | 19,96 | 1,98 | 96,9 | 11,81 | 93,49 | 74,35 | 1,38 | - |
| GALLINAS PONEDORAS | 2,43 | 1,52 | 1 | 30,3 | 3 | 147,1 | 17,92 | 141,9 | 112,8 | 2,09 | - |
| CERDOS | 0,08 | 0,05 | 0,03 | 1 | 0,1 | 4,85 | 0,59 | 4,68 | 3,72 | 0,07 | - |
| PAVOS | 0,81 | 0,51 | 0,33 | 10,1 | 1 | 49,05 | 5,98 | 47,33 | 37,63 | 0,7 | - |
| CABALLOS | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,21 | 0,02 | 1 | 0,12 | 0,96 | 0,77 | 0,01 | - |
| OVEJAS | 0,14 | 0,08 | 0,06 | 1,69 | 0,17 | 8,21 | 1 | 7,92 | 6,3 | 0,12 | - |
| TOROS | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,21 | 0,02 | 1,04 | 0,13 | 1 | 0,8 | 0,01 | - |
| VACAS | o,02 | 0,01 | 0,01 | 0,27 | 0,03 | 1,3 | 0,16 | 1,26 | 1 | 0,02 | - |
| TERNEROS | 1,16 | 0,73 | 0,48 | 14,49 | 1,43 | 70,34 | 8,57 | 67,87 | 53,97 | 1 | - |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

Debido a la contaminación ambiental que afecta a los cultivos, forrajes, etc. Los desechos agropecuarios tienen también contenidos importantes de metales pesados, como se presenta en el cuadro 4.9. Es importante considerar estos valores para la determinación del grado de inhibición de estos metales en el proceso de digestión anaeróbica.

**Cuadro 4.9: Contenido de metales pesados**

| SUSTRATO | Cd | Cr | Cu | Hg (mg/kg.MS) | Ni | Pb | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ESTIÉRCOL DE GANADO | 0,3 | 7,3 | 44,5 | 0,06 | 5,9 | 7,7 | 270 |
| PURÍN DE CERDO | 0,4 | 9,4 | 309 | 0,02 | 10,3 | 6,2 | 858 |
| MAJADA DE GANADO | 0,29 | 12,9 | 39 | 0,03 | 5,2 | 30 | 190 |
| ESTIÉRCOL DE CERDO | 0,33 | 10,3 | 450 | 0,04 | 9,5 | 5,1 | 1068 |
| GALLINAZA | 0,25 | 4,4 | 52,6 | 0,02 | 8,1 | 7,2 | 336 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

### 4.1.3. Evaluar la calidad del biogás producido.

El potencial calórico del biogás es de 4700 a 5500 Kcal/$m^3$ o 5-7 kWh/$m^3$ dependiendo del contenido de gas metano $CH_4$ y puede generar una cantidad de calor equivalente a 22.00 BTU/$m^3$ o 21,5 MJ/$m^3$ (573 BTU por pie cubico), valor que puede variar entre 19,7 y 23 MJ/$m^3$. Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varia de (650-750 °C). Como media, el biogás no purificado produce de 20 a 23 MJ/$m^3$ (4700-5500 kcal/$m^3$). Un metro cubico de biogás que se aprovecha en un generador de energía eléctrica es suficiente para generar 2 kWh de electricidad, generar 20 horas de luz equivalente a un bombillo de 100W, o hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas. Todos estos valares dependen considerablemente de la eficiencia de los equipos que se utilizan para el aprovechamiento del biogás, [30].

El cuadro 4.10 indica la composición del biogás expresado en porcentaje.

**Cuadro 4.10: Composición del biogás**

| COMPONENTES | UNIDAD | CONTENIDO |
|---|---|---|
| **METANO** | % | 60-70 |
| **DIÓXIDO DE CARBONO** | % | 30-40 |
| **HIDROGENO** | % | 5-10 |
| **NITRÓGENO** | % | 1-2 |
| **OXIGENO** | % | 0,1 |
| **SULFURO DE HIDROGENO** | % | 0-1 |
| **SATURACIÓN DE VAPOR DE AGUA** | % | 8-10 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

En el cuadro 4.11 se presenta algunas equivalencias energéticas del biogás.

**Cuadro 4.11 equivalencias energéticas 1 $m^3$ de biogás**

| CANTIDAD EQUIVALENTE | TIPO DE BIOMASA O SUSTRATO | CAPACIDAD ENERGÉTICA |
|---|---|---|
| 0,6 kg | DE DIESEL | 12 kWh/kg |
| 0,7 kg | CARBÓN | 8,5 kWh/kg |
| 0,6 $m^3$ | GAS NATURAL | 5,3 kWh/$m^3$ |
| 0,24 $m^3$ | GAS PROPANO | 25 kWh/$m^3$ |
| 1 $m^3$ de biogás | GENERAR ELECTRICIDAD | 2 kWh |
| 1 $m^3$ de biogás | GENERA 20 HORAS DE LUZ EQUIVALENTE A UNA LÁMPARA INCANDESCENTE. | 100 W |
| 1,43 kg | MADERA | 4,5 kWh |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

En el cuadro 4.13 se exponen las características más relevantes del biogás en relación con otros gases.

**Cuadro 4.13: Características de biogás y comparación con otros gases**

| TIPOS DE GAS | UNIDAD | BIOGÁS | GAS NATURAL | PROPANO | METANO | HIDROGENO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PODER CALÓRICO | $kWh/m^3$ | 6 | 10 | 26 | 10 | 3 |
| PESO ESPECIFICO | $Kg/m^3$ | 1,2 | 0,7 | 2,01 | 0,72 | 0,09 |
| RELACIÓN DE DENSIDAD AL AIRE | - | 0,9 | 0,54 | 1,51 | 0,55 | 0,07 |
| TEMPERATURA DE ENCENDIDO | °C | 700 | 650 | 470 | 600 | 585 |
| CONTENIDO DE OXIGENO PARA LA EXPLOSIÓN | Vol.-% | 6-12 | 4,4-15 | 1,7-10,9 | 4,4-16,5 | 4-7 |

**Fuente: Entec-Biogas 2002**

De la lectura del cuadro 4.13 se desprende que el biogás tiene un poder calorífico menor en comparación con el gas natural o el propano. Con una densidad de 1,2 $kg/m^3$ y menos pesado que el aire. Estas características hay que tomarlas en consideración, en lugares expuestos a fugas de biogás, ya que el mismo no se acumula en el suelo; sino que sube rápidamente a la superficie y se mezcla con el aire formando una mezcla explosiva. La temperatura de encendido del biogás, es relativamente alta, en un orden de 700°C. La velocidad de encendido es de unos 0,25 m/s. Debido al contenido de $CO_2$ del biogás se puede quemar cuando se mezcla con el oxigeno entre un contenido de 6-12%. En comparación con el propano e hidrogeno que necesitan menores porcentajes de oxigeno para el encendido.

El contenido de gas metano y dióxido de carbono que se produce de la materia orgánica depende, del tipo de sustrato que se aproveche en los biodigestores.

## FASE II EVALUAR DIFERENTES TIPOS DE BIODIGESTORES EXISTENTES EN EL MERCADO, ASÍ COMO PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA ESTABLECER LOS CRITERIOS DE DISEÑO.

### 4.2.1. Conceptualizar el Biodigestor, definiendo su estructura típica y su clasificación

Un **Biodigestor** es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia (en ausencia de oxigeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformar éste en **biogás** y fertilizante. Está compuesto por las siguientes partes. [31].

- ✓ Tubo de entrada de materia orgánica.
- ✓ Cámara de fermentación o cuerpo del Biodigestor.
- ✓ Cámara de depósito de gas.
- ✓ Cámara de salida del material estabilizado o fermentado.
- ✓ Conductor de gas. (lleva el gas para ser usado).
- ✓ Tapa hermética.
- ✓ Gasómetro.

Por su forma y estructura los biodigestores pueden agruparse en los siguientes diseños, [32].

- Según el almacenamiento del gas pueden ser:
  - Cúpula fija.
  - Cúpula móvil.
  - Con depósito flotante, o de presión constante.
  - Con gasómetro de Caucho o material plástico en forma de Bolsa.
- Según su forma geométrica puede ser:
  - Cámara vertical cilíndrica.

- Cámara esférica.
- Cámara ovalada.
- Cámara rectangular.
- Cámara cuadrada.

- Por los materiales de construcción pueden ser:
- De ladrillo.
- De mampostería.
- De hormigón armado.
- De plástico.

- Según su posición respecto a la superficie pueden ser:
- Superficiales.
- Semienterrados.
- Subterráneos.

### 4.2.2. Establecer los mecanismos de operación del Biodigestor.

El tanque de digestión, posee una tubería de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, estiércol animal o humano, las aguas sucias de las ciudades, residuos de matadero) en forma conjunta con agua, y una tubería de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor. Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

### 4.2.3. Establecer los tipos de biodigestores existentes en el mercado.

#### 4.2.3.1. Modelo Hindú

El biodigestor hindú fue desarrollado en la India después de la segunda guerra mundial en los años 50, surgió por necesidad ya que los campesinos necesitaban combustible para los tractores y calefacción para sus hogares en época de invierno, luego cuando terminó la guerra se volvió a conseguir combustibles fósiles por lo que dejaron los biodigestores y volvieron a los hidrocarburos. Como India es pobre en combustibles se organizó el proyecto KVICK (Kaddi Village Industri Commision) de donde salió el digestor Hindú y el nombre del combustible obtenido conocido como biogas. Este digestor trabaja a presión constante y es muy fácil su operación, ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de muy poca preparación. Se distingue por el uso de una campana móvil, que asciende al aumentar la presión del gas dentro de ella; esta puede ser de metal, hormigón o plástico. Además, el digestor está compuesto por un tanque de almacenamiento en forma cilíndrica, que puede ser construido de piedra, ladrillo y hormigón. Para permitir la entrada de la materia orgánica y la salida del biofertilizante se emplean dos tubos (de plástico, fibrocemento, cerámica u otros) que conectan el tanque de almacenamiento con el de carga y descarga; también cuenta con tuberías, válvulas de corte y seguridad que garantizan el buen funcionamiento del biodigestor, [31].

#### 4.2.3.2. Modelo Chino

El biodigestor chino fue desarrollado al observar el éxito del biodigestor Hindú, el gobierno chino adaptó esta tecnología a sus propias necesidades, ya que el problema en China no era energético sino sanitario. Los Chinos se deshicieron de las heces humanas en el área rural y al mismo tiempo, obtuvieron abono orgánico, con el biodigestor se eliminan los malos olores y al mismo tiempo se obtiene gas para las cocinas y el alumbrado. El biodigestor chino funciona con presión variable ya que el

objetivo no es producir gas sino el abono orgánico ya procesado. Este reactor consiste en una cámara de gas-firme construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cima y " fondos son hemisféricos y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y con extremos nivelados. Hay un tapón de la inspección a la cima del digestor, que facilita su limpieza. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo, y cambia de sitio, algunos volúmenes del digestor en la cámara del efluente, con presiones en el domo entre 1 y 1.5 m de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas, y es la razón para la cima hemisférica y el fondo. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor. Más de cinco millones de biodigestores se ha construido en China y han estado funcionando correctamente (FAO, 1992) pero, desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de China, [31].

Esta instalación tienen como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

#### 4.2.3.3. Modelo de Estructura Flexible

La alta inversión que exigía construir el biodigestor de estructura fija, resultaba una limitante para el bajo ingreso de los pequeños granjeros. Esto motivó a ingenieros en la Provincia de Taiwán en los años sesenta (FAO, 1992) a hacer biodigestores de materiales flexibles más baratos. Inicialmente se usaron nylon y neopreno pero resultaron ser, relativamente costosos. Un desarrollo mayor en los años setenta era combinar PVC con el residuo de las refinerías de aluminio producto llamado "el barro rojo PVC."

Esto fue reemplazado después por polietileno, menos costoso que los materiales utilizados con anterioridad y es ahora el material más comúnmente usado en América

Latina, Asia y África. Desde 1986, el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando biodigestores de plástico económico como la tecnología apropiada por hacer mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo la presión así, en otros recursos naturales, [31].

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con Biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma.

#### 4.2.3.4. Modelo Flotante

Un rasgo innovador de usar polietileno tubular, es que los biodigestores pueden localizarse para flotar en cualquier superficie de agua, con la mitad sumergida, su boca se localizada sobre el nivel de agua más alto, mientras la toma de corriente debe ajustarse a un objeto flotante, como un coco seco o un recipiente de plástico. En Vietnam más de 5% de los biodigestores flotantes se ubican en estanques que facilitan su instalación, generalmente donde el espacio de las granjas es limitado, [31].

#### 4.2.3.5. Modelo digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno

Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta 30 % con respecto a los prototipos tradicionales, es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales. Este tipo de instalación

tiene a su favor, el ser más económica que los sistemas tradicionales; por ejemplo, una instalación de 4 m³ puede costar, aproximadamente, $550 USD, y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida útil, [31].

#### 4.2.3.6. Digestores de alta velocidad o flujo inducido

Estos son los utilizados comúnmente en instalaciones industriales o semindustriales. Generalmente trabajan a presión constante, por lo que se podrían catalogar como Digestores Tipo Hindú Modificado, [31].

Se les conoce comúnmente como CSTD (Conventional Stirred Digestor). Se diferencian de los digestores convencionales en que se les ha agregado algún tipo de agitación mecánica, continua o intermitente, que permite al material aún no digerido, entrar en contacto con las bacterias activas y así obtener buena digestión de la materia orgánica, con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, de hasta 15 días continuos. Este es un concepto nuevo dentro de la tecnología de fermentación anaeróbica, combina las ventajas de varios tipos de digestores en una sola unidad, facilitando el manejo y procesamiento de material biodegradable de diverso origen y calidad.

Generalmente los desechos de origen animal, excrementos de cualquier clase, son procesados en digestores convencionales de tipo continuo, que periódicamente reciben carga y entregan por desalojo efluentes ya digeridos. El tiempo de operación continua de estos equipos es bastante largo y requiere un mínimo de atención al momento de cargarlos, como es el evitar introducir elementos extraños tales como arena, piedra, metal, plásticos o cualquier otro tipo de material lento o imposible de digerir. Luego de unos cuatro o cinco años se debe detener su funcionamiento para hacer una limpieza general y retirar sedimentos indigeridos.

#### 4.2.3.7. Modelos de Segunda Generación

El digestor de segunda generación opera básicamente en dos niveles. En la parte baja del mismo se construye un túnel o laberinto, que sirve para retener temporalmente todos los materiales que tienden a flotar; con las divisiones internas se divide el laberinto en una serie de cámaras independientes pero comunicadas entre sí de forma continua. Por medio de planos inclinados y ranuras delgadas en las placas de ferro-cemento que conforman el techo del laberinto, se permite el paso del gas y del material ya hidrolizado y degradado, [30].

Los materiales lentamente digeribles, que completan su ciclo de degradación anaeróbica en más de 100 días, pueden hacerlo al tiempo con excrementos que requieren mucho menos tiempo, entre 15 y 20 días continuos, [30].

#### 4.2.3.8. Modelos de Tercera Generación

El digestor de tercera generación es la mezcla de varios digestores en una unidad. El laberinto es típico del sistema de Tapón o Bolsa, con longitudes efectivas de 20 a 30 metros, es el sistema más sencillo y práctico de todos los digestores de tipo convencional; las diferentes cámaras independientes (6 o más según el diseño) brindan las ventajas de los digestores de carga única; al final del recorrido y en la parte superior, se encuentra la última recamara, grande, que equivale al digestor tipo Hindú, con su campana flotante, carga por la parte inferior y salida del efluente por rebose en la superior, [30]. Este tipo de digestor en especial, ofrece una doble ventaja económica, ya que por un lado se construye una sola unidad del tamaño adecuado a las necesidades en lugar de varias independientes más pequeñas, y por otro lado, se elimina el costo de mano de obra necesaria por carga y descarga periódica de las unidades de carga única.

## FASE III DIMENSIONAR LA PLANTA DE BIOGAS Y SUS ESTRUCTURAS

### 4.3.1. Establecer las dimensiones de las estructuras que conforman la planta de generación de potencia a través del aprovechamiento de la biomasa disponible. A continuación se establecen las estructuras a ser dimensionadas.

#### 4.3.1.1. Tanque de Alimentación

Los tanques de alimentación se dimensionan para el volumen diario de alimentación del digestor. La mezcla se realiza una vez al día y se programa para que toda esta carga alimente al digestor en 8-10 horas en forma automática o manual. Este volumen incluye el volumen de la biomasa y del agua que se utiliza para la dilución. El volumen de agua que se debe adicionar para la dilución de la biomasa depende del porcentaje de masa seca de la biomasa, [30].

En algunos casos se prefiere dimensionar el tanque de alimentación para que almacene la mezcla de biomasa con agua requerida en un periodo de 1-2 horas, es decir, se mezcla cada vez solo la biomasa requerida para este periodo. La desventaja de esta selección es que se mezcla la biomasa varias veces al día. La ventaja es que se reduce el volumen del tanque de alimentación.

Por lo tanto, y para el caso anterior, se deberá analizar la alternativa más factible y más económica. El llenado cada hora del tanque significa una reducción de los volúmenes del mismo pero aumenta los costos operacionales y la logística de transporte de biomasa se complica.

Procedimiento a seguir para el dimensionamiento:

- Tipo de biomasa: Para la referencia de este trabajo de investigación se hará consideración a los desechos agropecuarios tipo vacuno.
- Se considera que aproximadamente $1m^3$ de biomasa equivale a 800 kg de la misma.
- Cantidad de biomasa disponible: Q = $m^3$/día.
- Porcentaje de masa seca (MS) = %
- Masa Seca= (Q x %MS)/100
- Porcentaje de dilución recomendada (D)= 10%(90% agua)
- Volumen de agua para mezcla Vm:
- Afluente requerido= MS/D
- Vm= Afluente requerido - cantidad de biomasa disponible.
- Volumen útil del tanque de alimentación = Afluente requerido
- Se debe prever un borde libre del tanque en el tanque mínimo 0,50 m.

Del procedimiento anterior se determina que la selección del porcentaje de dilución es muy importante y determinante para establecer el volumen diario requerido para el digestor. También influyen directamente en el tamaño del digestor.

#### 4.3.1.2. Sistemas de Alimentación

El tamaño o la potencia del sistema de alimentación dependen de la rutina diaria de alimentación. Si los periodos de alimentación son mayores, se reduce la potencia de los sistemas. En el caso de la alimentación por bombeo, si se bombea la biomasa en ocho (08) tandas por día, se reduce la potencia de las bombas comparadas con el caso que se alimente el digestor únicamente en cuatro (04) tandas, [30].

#### 4.3.1.3. Digestor

Una vez que se selecciona el TRH, la COV máxima y se ha calculado el volumen de biomasa más el volumen de agua requerido para la dilución, se procede al cálculo del volumen del digestor. Para el dimensionamiento se recomienda considerar el flujo-grama que se expone a continuación.

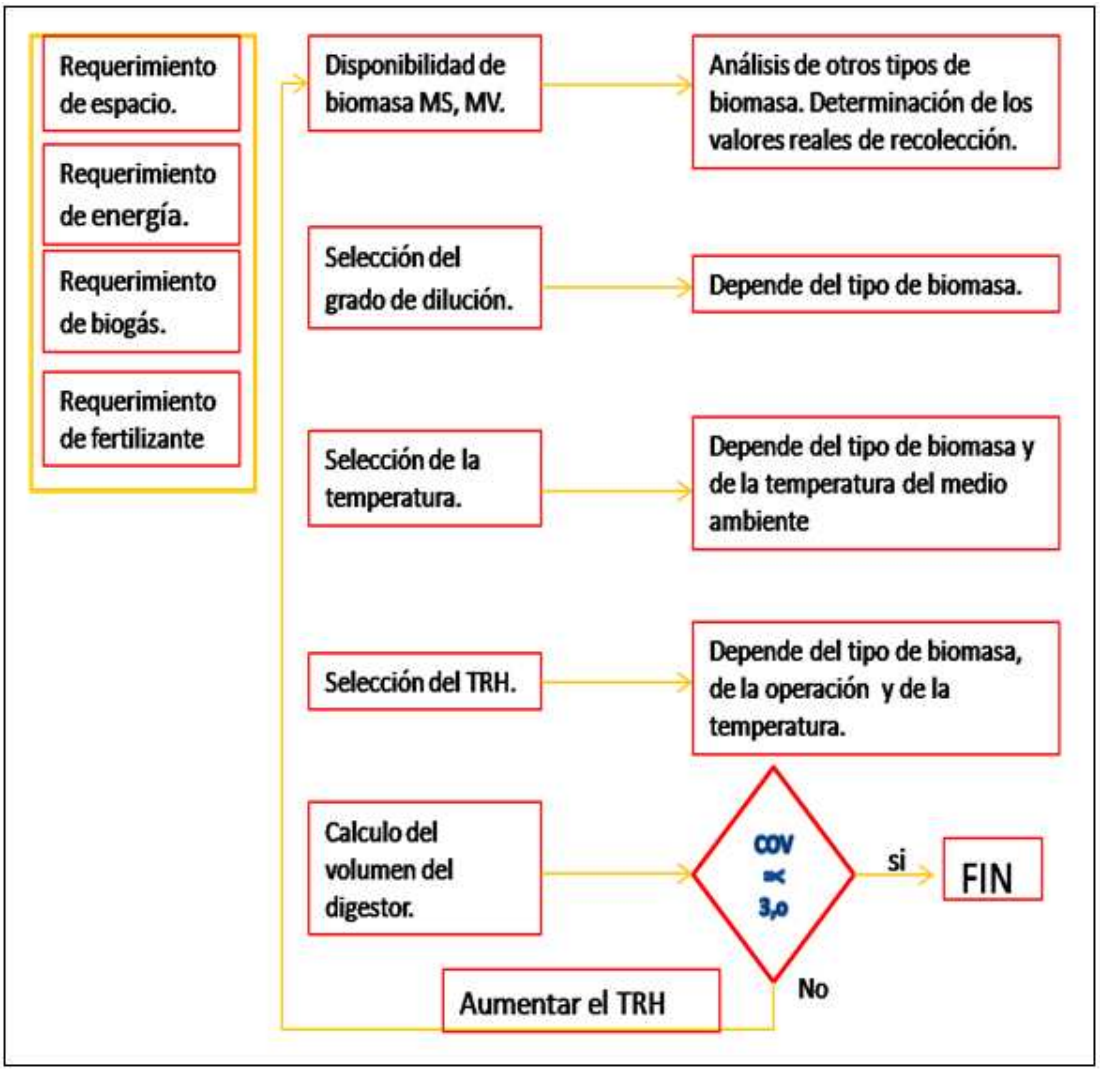



**Figura 4.27. Flujo-grama para dimensionar digestores.**

El volumen útil del digestor se calcula a través de la multiplicación del volumen de biomasa + el volumen de agua (Q afluente) por el TRH.

Procedimiento para el dimensionamiento del digestor

- Biomasa Vacuna =$m^3$/día.
- MS= %
- MV= %
- $Q_{afluente}$= (Q + $V_m$)
- TRH = días (seleccionado en base a la temperatura y tipo de biomasa)
- Volumen útil del digestor $V_d$= Q afluentes x TRH = $m^3$
- COV = MV/$V_d$ ( Kg/$m^3$.d)
- MV= (Q x %MS)/(100 x MV)= $m^3$
- Peso especifico del animal = kg/$m^3$ (se determina para cada caso)
- MV= ((MV x Peso especifico de la biomasa).
- COV= MV/$V_d$= kg/$m^3$.d

El volumen total del digestor comprende el volumen útil, mas el volumen para almacenamiento del biogás y un % de seguridad (borde libre). Generalmente se debe designar un borde libre de 1,00 m o el equivalente a un 20% del volumen calculado. Se asigna este porcentaje de seguridad para cubrir eventuales variaciones en la producción de biomasa. El volumen mínimo para el almacenamiento de biogás en el digestor debe ser de cuatro a seis (4-6) horas de producción de biogás.

#### 4.3.1.4. Tanque de Descarga

El tanque de descargas se dimensiona para que almacene el biol, o fertilizante que se descarga del digestor. Gran parte de la masa seca se degrada en el digestor, por lo que se obtiene una reducción de los volúmenes diarios de carga. Pero es recomendable que para el cálculo del volumen del tanque de descarga y por razones de seguridad, no se considere esta reducción del volumen, [30].

El volumen del tanque dependerá del volumen de afluentes al digestor y del aprovechamiento del fertilizante en la agricultura o de comercialización. Como mínimo el volumen del tanque de descarga debe corresponder al volumen del afluente del digestor.

Si es que el afluente del digestor se utiliza como fertilizante en las mismas instalaciones se debe prever un volumen de almacenamiento de varios días, semanas en caso que no existan áreas de cultivos en donde se pueda descargar el fertilizante. El volumen necesario para el tanque de descarga se debe determinar para cada proyecto en base a este análisis.

#### 4.3.1.5. Lecho de Secado

El dimensionamiento de los lechos de secados se realiza en base a la cantidad de lodos que se extraen diaria o semanalmente de los digestores, y la tasa de aplicación de lodos (TAL) que se aplica al lecho en kg/m² de área. La tasa de aplicación de lodos depende, de la temperatura del medio ambiente y de la evaporación. Para climas fríos con temperaturas ambientes promedios menores a 21°C la TAL es de aproximadamente 25 kg/m². Para temperaturas de aire mayores a 21°C y que alcanzan picos de hasta 30°C la TAL puede llegar hasta 50 kg/m², [30].

Para la estimación de la cantidad de lodos que se extraen del digestor hay que tomar en cuenta el tipo de biomasa, el porcentaje de dilución y el periodo o lapso de tiempo en que se realiza la descarga. Si la descarga se realiza semanalmente. Para este cálculo se debe estimar que aproximadamente el 60% de la masa volátil se libera en biogás. El resto se asienta en el fondo del digestor y debe ser descargado al lecho de lodos conjuntamente con las arenas y material extraño que se alimenta el digestor. Realmente en la práctica se degrada en algunos casos hasta el 75% de la masa volátil.

#### 4.3.1.6. Tuberías de captación y conducción de biogás

Para el dimensionamiento de las tuberías de captación de biogás se debe determinar primeramente el volumen de producción de biogás. En base a este volumen de producción se determina el número de tuberías de captación. El diámetro de cada tubería se determina en base a la velocidad máxima de conducción de cada tubería y al volumen de biogás que debe captar cada tubería. El diámetro mínimo de estas tuberías de captación debe ser de 50 mm. La velocidad máxima de flujo debe ser <=3,5 m/s. Cada digestor debe tener por lo menos 2 tuberías de captación de biogás. El dimensionamiento de las tuberías se realizara en base a lo establecido por el software Biodigestor©.

#### 4.3.1.7. Sistemas de purificación de biogás

Los sistemas de tratamiento para la reducción o eliminación de $H_2S$ y en general para compuestos que generen malos olores se clasifican en tratamientos físico-químicos y biológicos. Dentro de los sistemas de tratamiento físico-químicos para la reducción del $H_2S$ se encuentran la absorción, la adsorción, (filtros de carbón activado), la oxidación química o catalítica, la centrifugación que elimina partículas y/o aerosoles, la filtración y electro filtración etc.

Los tratamientos físico-químicos son más costosos que los biológicos y cuando se trata de gases con bajas concentraciones de compuestos que producen mal olor y altos flujos de biogás. Además, los procesos químicos generan siempre otro producto que puede ser más contaminante que el elemento que se quiere eliminar. Los procesos físico-químicos pueden reducir eficientemente él $H_2S$dentro de ciertas condiciones con la necesidad de adición de productos químicos, lo que ocasiona costos de operación bastante elevados si son comparados con los tratamientos biológicos.

En general, las ventajas de los procesos biológicos son, la transformación de los contaminantes a sustancias no peligrosas sin acumulación de subproductos o desechos de difícil manejo, tienen bajos costos de operación y balance energético adecuado.

A continuación se describen los siguientes sistemas de remoción de $H_2S$.

- Reducción biológica del $H_2S$.
- Filtros biológicos.
- Filtros biolavadores.
- Filtros de carbón activado.
- Tratamientos químicos por oxidación.
-

Para la selección del proceso más adecuado en la reducción del $H_2S$ se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros.

- Nivel de $H_2S$ en el biogás.
- Caudal de biogás a tratar.
- Volumen de $H_2S$.
- Contenido de $H_2S$ ppm.
- Peso de $H_2S$.
- Q, caudal de gas.

#### 4.3.1.7.1. Selección del proceso más adecuado

Los criterios de selección más importantes se basan en la cantidad de $H_2S$ a remover, la inversión inicial y el costo operativo del proceso. Existen otros factores que deben tenerse en cuenta a la hora de la selección tales como, la simplicidad para la operación, la sencillez y el tamaño de las instalaciones y los equipamientos requeridos, la continuidad y la certeza de las condiciones del proceso y de los niveles de contaminación, la urgencia con la cual se requiere solucionar el problema de contaminación, así como también las características ambientales del producto tanto en su forma reaccionando como sin reaccionar y los cuidados que deberán tener en cuenta las personas que manipulen el producto.

Los tratamientos biológicos son ambientales amigables y requieren bajos costos de inversión, de operación y mantenimiento. Únicamente requieren de un exacto control de la cantidad de oxigeno que se suministra al interior del digestor ara su optimo funcionamiento. De igual manera los procesos de biofiltración, requieren de bajos costos operativos y pueden aplicarse para varios limites de remoción de $H_2S$. Los procesos biológicos son los más utilizados en países europeos donde la exigencia ambiental es bastante alta.

La reducción de $H_2S$ por medio de esponjas o limaduras de hierro no es ecológicamente amigable. Se produce siempre un desecho que debe ser reciclado y/o adecuado previo a su disposición al medio ambiente. Se requiere de materiales (esponjas) de constante reposición.

Otro compuesto que se debe eliminar son los siloxanos (enlaces silicio-Oxígenos) pues se forman depósitos de sílice en los componentes de los equipos provocando su abrasión. Actualmente no existe un método estándar para la eliminación de siloxanos del biogás. Los sistemas de tratamiento actuales se basan en

métodos físicos como son la condensación, adsorción o absorción, con numerosas desventajas (alta demanda de energía, elevados costos de regeneración y necesidad de eliminación del material contaminante en el caso de adsorción).

#### 4.3.1.7.2. Purificación biológica del biogás-remoción de $H_2S$.

La purificación del biogás por medio del suministro o soplado de pequeños volúmenes de oxigeno al interior del digestor es un proceso que se ha desarrollado efectivamente en los últimos 10 años y que se aplica frecuentemente para la purificación de biogás en biodigestores que se construyen en Europa y en particular en Alemania. Las bacterias oxidantes, sulfobacter transforma el $H_2S$ en azufre elemental y acido sulfúrico y agua a través del suministro de Oxigeno. Durante este tratamiento se obtiene polvo amarillo de azufre que se deposita sobre la superficie de la biomasa, en las paredes interiores del digestor y sobre una cubierta de madera que se construye para este caso. Este polvo de azufre se lo puede utilizar como fertilizante, [33].

El suministro o soplado de oxigeno se lo realiza por medio de compresores o bombas de aire. Si la dosificación de oxigeno se realiza correctamente se puede obtener reducción de $H_2S$ de hasta 95%. La cantidad de oxigeno que se suministra al digestor es tan baja que no ay problemas de explosión al interior del digestor, [33].

A continuación se indican las condiciones que deben regir para la aplicación de este proceso.

- Las bacterias sulfobacter deben existir en la biomasa y no tienen que ser suministradas a la biomasa. Estas bacterias necesitan de oxigeno para reproducirse, crecer y hará transformar el $H_2S$ en azufre

elemental. Estas bacterias necesitan de superficies húmedas y calientes para depositar en estas áreas el azufre elemental. Los nutrientes para su crecimiento los obtiene de la biomasa. Las superficies donde se asientan el azufre elemental lo forman la superficie de la biomasa al nivel máximo de llenado y las paredes internas del digestor. Se requiere aproximadamente de 1m² de superficie por cada m³ de biogás que se debe purificar, dependiendo también del contenido de $H_2S$, [33].

- Los volúmenes de oxigeno que se suministran al digesto están en el orden del 2,5 al 5 % del volumen diario de biogás que se debe tratar. Cantidades menores o mayores a estas son perjudiciales para este proceso. Se debe prever un sistema de control para que el volumen de oxigeno que se suministre al digestor corresponda al volumen de biogás que se produce en el mismo. Hay que tener muy en cuenta que el volumen de oxigeno no supere el límite del 5% ya que si aumenta este valor a un % del 10-12% se forma una mezcla explosiva de oxigeno y biogás. También cantidades mayores al 5% de oxigeno reducen la calidad del biogás, aunque no se forme una mezcla explosiva, [33].

- La eficiencia de este proceso depende de la temperatura al interior del digestor. A bajas temperaturas se requiere mayor áreas para la acumulación de azufre elemental, [33].
- La efectividad del proceso depende mayormente del suministro de oxigeno. Si varia el suministro de oxigeno o si se deja de suministrar por un espacio de 8-10 horas se paraliza la reducción de $H_2S$ y aumenta su concentración, [33].

- Para que este proceso biológico de óptimos resultados es importante que el suministro de oxigeno sea proporcional a la producción de biogás. Se debe instalar un sistema lógico de control para que el suministro de oxigeno sea regulado de acuerdo a la producción de biogás, [33].

La figura 4.28 muestra el proceso descrito con anticipación.

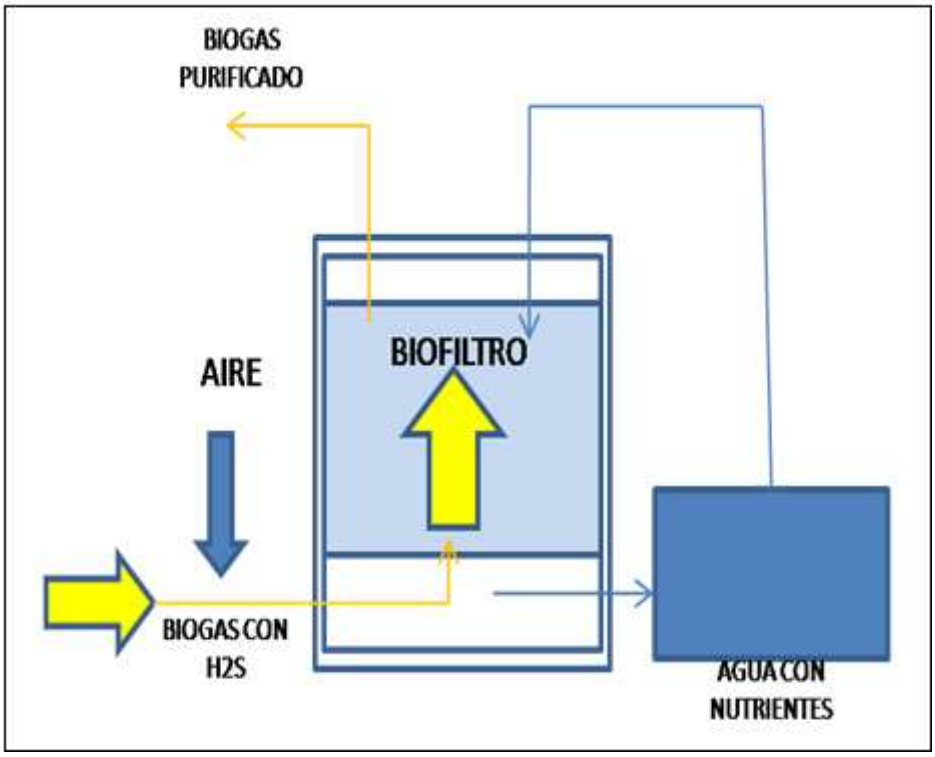



**Figura 4.28. Diagrama del proceso de biofiltración exterior**

Aparte de este proceso se puede purificar el biogás en unidades externas de filtración. Se le realiza por medio de biofiltros con un medio filtrante que purifica el $H_2S$ . Se suministra una mezcla de fertilizante y liquido acuoso en sentido contrario al flujo de biogás. Esta mezcla acuosa sirve como nutriente para las bacterias. Este proceso tiene la ventaja que el suministro de oxigeno no se realiza en el digestor.

**Bases técnicas para el diseño**

Durante la reducción del $H_2S$ por medio del suministro de oxigeno al interior del digestor, se reduce el $H_2S$ a azufre elemental. La reducción química se presenta en la siguiente ecuación, en la cual se oxida el acido sulfhídrico ($H_2SO_3$), [33].

$$2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O \quad (19)$$

$$2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2H_2SO_3 \quad (20)$$

El azufre elemental se asienta en la superficie de la biomasa, formando una capa amarilla. El acido sulfhídrico trae consigo problemas de corrosión en la zona de transición entre el área donde se acumula el biogás y el límite de llenado de la biomasa, [33].

La demanda estequiometrica de oxigeno en moles para la reducción del $H_2Se$ s de 0,5 a 1,5 mol por cada mol de $H_2S$, de acuerdo a la siguiente expresión, [33].

$$r_{O_2/H_2S} = \frac{1\text{mol}_{O_2}}{2\text{mol}_{H_2S}} \; o \; \frac{3mol_{O_2}}{2mol_{H_2S}} \quad (21)$$

Esto significa que como mínimo hay que suministrar entre 0,5 – 1,5 veces la cantidad de oxigeno por la cantidad de $H_2S$ que hay que eliminar. Por ppm de $H_2S$ se requiere de 1,5 ppm de oxigeno. Este valor corresponde un volumen de 0,00151 litros de oxigeno por $m^3$ de biogás para reducir 1ppm de $H_2S$.

Si se requiere reducir 2000 ppm de $H_2S$ de un volumen de biogás, se necesita 3 litros de $O_2/m^3$biogas o también 14,3 litros aire/$m^3$biogas (si es que se estima un contenido del 21% de oxigeno en el aire)

La mayoría de las plantas de biogás agroindustriales producen alrededor de 60-250 $m^3/h$ (1 y 4,17 $m^3/min$). Para una reducción total de $H_2S$ de 200 a 0 ppm se requiere entre 3 y 12,5 litros de $O_2$/min o 14,3 y 59,5 litros de aire/min.

Resumiendo, el cálculo del requerimiento mínimo para la reducción de $H_2S$ se lo debe realizar de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\text{Aire}_{\min} = \left[\frac{(1{,}5\ x10^{-6})}{0{,}21}\right] x H_2S x V_{biogas} \left(\frac{m^3{}_{aire}}{h}\right) \qquad (22)$$

En donde:

$H_2S$ : es la cantidad de sulfuro de hidrogeno que se quiere reducir en ppm.

$V_{biogas}$: es el volumen de biogás en ($m^3/h$)

En aire debe inyectarse directamente en la zona de transición entre la superficie de la biomasa y la zona de almacenamiento de biogás. En estas zonas se dan las mejores condiciones para el crecimiento de las bacterias reductoras de $H_2S$. Si la inyección de oxigeno se realiza en otros lugares desfavorables, es probable que solamente una parte del oxigeno llegue a las zonas en que realmente se necesite para las formaciones de las bacterias. Lo más recomendable es que la inyección de oxigeno se realice en diferentes lugares en el digestor, a unos 20-30 cm sobre la superficie de llenado máximo de la biomasa.

Las bacterias reductoras de $H_2S$ pueden asimilar el oxigeno, nutrientes y reducir el $H_2S$ unicamente si este se encuentra en forma disuelta. El oxigeno que se inyecta al digestor tiene que trasferirse a la fase liquida para que esté disponible para las bacterias reductoras de $H_2S$.

**Superficie para la fijación de Azufre elemental**

Si las bacterias reductoras de $H_2S$ no se encuentran las condiciones optimas para aprovechar el aire u oxigeno inyectado, este oxigeno se descargara conjuntamente con el biogás. Las bacterias se forman y crecen únicamente donde exista oxigeno, $H_2S$ y nutrientes, mayormente en la superficie de la biomasa. Si es que no se forman capas por la agitación de la biomasa, sobre las cuales se asientan las bacterias reductoras de sulfuro de hidrogeno, no se realizara la reducción del $H_2S$. Por otro lado si se forman capas de costras sobre la superficie de la biomasa, estas pueden inhibir el proceso anaeróbico y reducir la producción de biogás. Por lo expuestos hay que encontrar un término medio para suplir las dos necesidades.

Adicionalmente hay que tener en cuenta que las bacterias reductoras de $H_2S$ son más eficientes a temperaturas de aproximadamente 35°C. En la mayoría de los casos la temperatura de la biomasa puede transmitirse a la zona de crecimiento de las bacterias reductoras de $H_2S$ unicamente por medio de agitación.

La formación del oxigeno disuelto es proporcional al contenido de oxigeno en la fase gaseosa. El oxigeno requerido en la fase gaseosa lo determina la concentración de $H_2S$. El volumen de liquido requerido para la absorción del oxigeno se determina en base a la siguiente ecuación, [33].

$$V_{liquido} = \left[\frac{\left(1(po + pu)xM_{O_2}xV_{biogas}\right)}{H_{h-O_2}xRxT)}\right]\left(\frac{m^3}{h}\right) \quad (23)$$

#### 4.3.1.7.3. Filtros Biológicos

El tratamiento biológico de gases contaminantes ha emergido como una alternativa a los sistemas convencional de tratamiento de gases especialmente cuando los compuestos contaminantes se encuentran en una baja concentración y flujo a tratar es elevado. El principal componente del biofiltro es el medio filtrante donde los compuestos indeseables en el biogás son absorbidos y adsorbidos para poder ser degradado posteriormente por microorganismo que se forman en el medio filtrante. El biogás es introducido al lecho filtrante por medio de un soplador (blower), la biofiltración de emisiones gaseosas es un proceso que utiliza poblaciones microbianas puras o mixtas establecidas sobre el soporte orgánico de elevada porosidad, [33].

El filtro para la biofiltración consistente en un tanque relleno de un medio filtrante que se puede ser tierra, virutas de madera, turba, bagazo de caña,, piedra pómez, lodo piedra volcánica, cascarilla de arroz, o una mezcla de estos elementos, acondicionada con un material abultante (partículas de poliestireno, madera, plumas, hojas secas, piedras, etc.), cuya función es dar soporte y en algunos casos sirve como fuente de nutrientes a los microorganismos. Una fracción de espacios vacios alto (producidos por el material abultante) favorece una baja caída de presión del gas en la cama así como una adecuada oxigenación del filtro y distribución del flujo de gas, [33].

Estos elementos forman una mezcla de materiales naturales con un área específica y espacios vacios grandes. Este medio filtrante sirve como soporte para el crecimiento de bacterias o microorganismos que reducen el $H_2S$. El medio posee la

superficie y los nutrientes necesarios para que en ella se desarrolle un biofilme de microorganismos que serán los responsables de la degradación del $H_2S$. En algunos casos se utiliza material inerte para la composición del lecho por medio del cual los gases son tratados en sentido ascendente o descendente. Este lecho debe ser mantenido húmedo a través de aspersión con agua y una mezcla acuosa con fertilizantes o biomasa sobre la superficie del mismo que sirve de nutrientes.

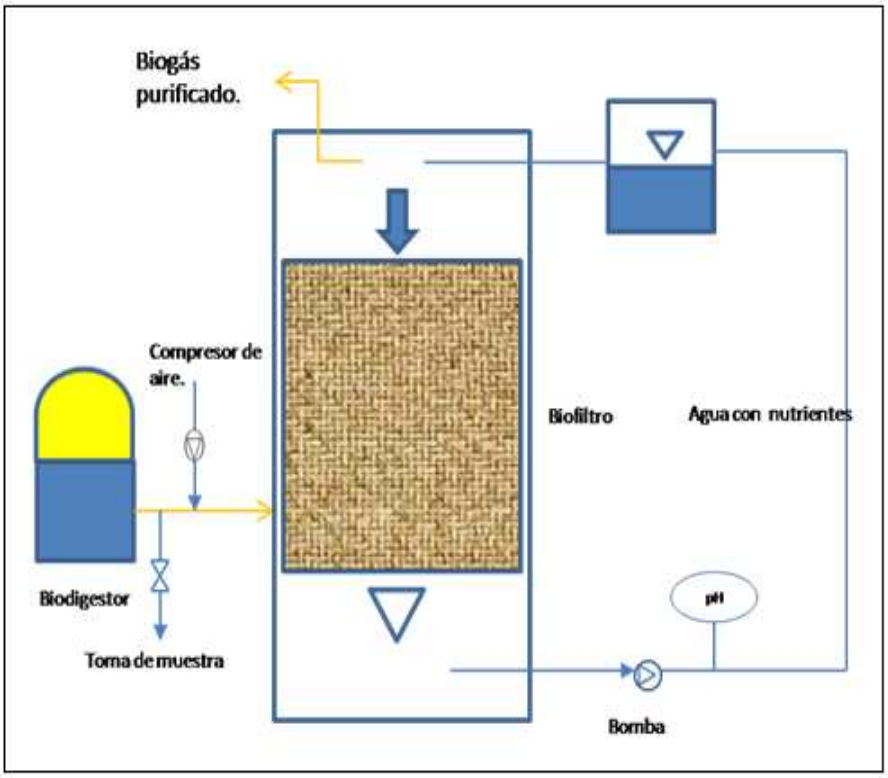



**Figura 4.29. Proceso de biofiltración con alimentación externa de nutrientes y humedad**

Como se muestra en la figura 4.29, durante el proceso de biofiltración el biogás contaminado pasa a través de los macro poros del material filtrante. La explicación de este proceso implica producción de biomasa y la oxidación parcial o total del contaminante. A su vez, la biomasa, bajo ciertas condiciones sufre una oxidación por respiración endógena. De esta manera, los procesos de biofiltración dan

lugar a una descomposición completa de los contaminantes, creando productos no peligrosos.

A medida que el gas atraviesa el lecho poroso, los contaminantes son degradados por la biomasa activa, que los utiliza como fuentes de nutrientes y/o energía. Las poblaciones microbianas se pueden establecer en forma natural sobre el soporte orgánico o ser aisladas, desde lugares expuestos a los compuestos contaminantes y luego inoculados sobre el soporte. Los biofiltros inoculados con cultivos mixtos o puros presentan un menor tiempo de puesta en marcha y una operación más estable.

La remoción biológica de $H_2S$ puede ser llevada a cado por una gran variedad de microorganismos. Estos microorganismos han sido reportados en sistemas de biofiltración inoculados con lodos activados y lodos de desecho provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales también en sistemas inoculados con Hipomicrobium y Xanthomonas. Particularmente convenientes para la bio-oxidación de $H_2S$ son las bacterias del género finales de electrones y además son autógrafas, esto es, utilizan $CO_2$ como fuentes de carbono. Dentro del género Thiobacillus se encuentran las bacterias acidofilas como Th ferroxidans, Th Thioxidans, Th. Denitrificans, y neutrófilas como Th. thiparus siendo esta ultima particularmente interesante debido a que se ha reportado que posee capacidad degradativa sobre otros compuestos sulfurados reducidos volátiles, [33].

Los biofiltros han sido aplicados también con éxito en el tratamiento de malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales así como en plantas de compostaje (eliminación HS). También han sido igualmente exitosos en el tratamiento de compuestos como amoniaco, monóxido de carbono, acetona, benceno, butanol, acetato de butilo, dietilena, disulfuro cd cimetilo, etanol, hexano, etilbenceno, butilaldehido, metanol, metiletilcetona, estireno, isopropanol,

metilmercaptano, mono-di-, triclometano, oxido de nitrógeno, tricoroetano, tetracloroetano, 2-etil-hexanol y xileno, [33].

Las bacterias desempeñan las principales funciones tanto en los procesos oxidativos como en los reductores del ciclo. Las bacterias oxidadoras del sulfuro y del azufre, que a menudo son quimiolitotrófas producen sulfato y las bacterias reductoras utilizan el sulfato como aceptor de electrones en la respiración anaeróbica, produciendo sulfuro de hidrogeno. Dado que el sulfuro es toxico y reacción también con varios metales, la reducción de sulfato como aceptor de electrones en la respiración anaeróbica, produciendo sulfuro de hidrogeno. Dado que el sulfuro es toxico y reacción también con varios metales, reducción de sulfato es un importante proceso biogeoquimico. El dimetil-sulfuro es el principal compuesto de azufre con significado ecológico, [33].

- PARAMETROS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACION

Los principales parámetros de diseño de un sistema de biofiltracion son los siguientes.

- Características del gas contaminante (concentración, flujo, presencia de partículas, temperatura).
- Cargas superficiales.
- Selección del material filtrante.
- Contenido de humedad del material filtrante.

Este tipo de biofiltros se pueden construir en acero inoxidable, fibra de vidrio y hormigón armado. En el caso de hormigón se debe prever un revestimiento epoxico al interior para evitar corrosión de las paredes expuestas al $H_2S$.

- CARACTERISTICAS DEL GAS CONTAMINANTE

Las características del biogás a tratar son muy importantes en la determinación de la eficiencia de remoción de un sistema de biofiltración. En base a la concentración del gas contaminante se puede seleccionar el tipo de biofiltro. Generalmente para los sistemas de biofiltracion se ha considerado que el rango de concentración óptimo de 0 a 5 gr por $m^3$ de medio filtrante, sin embargo, en los últimos años se han reportado sistemas de biofiltracion capaces de degradar concentraciones mayores, [33].

Respecto a la temperatura del gas contaminante, si es mayor de 40°C será necesario un proceso de pre-tratamiento para reducirla, pues puede verse afectado el proceso metabólico de los microorganismos responsables del proceso de descontaminación. Los sistemas de humidificadores tienen en estos casos la doble función de aumentar la humedad relativa y de reducir la temperatura del gas a tratar.

- CARGAS SUPERFICIALES.

Las cargas superficiales va en común acuerdo con el tiempo de retención. Este valor tiene un rango de aplicación de 60-100 $m^3/m^2h$ correspondiente a tiempos de residencia del gas de 60 y 44 segundos respectivamente. Como estas cargas superficiales las eficiencias son mayores a 90%, [33].

- LECHO FILTRANTE

Son muchos los factores que tienen influencia en el desempeño del lecho: humedad, tasa de aplicación, composición del material de relleno del filtro,

oxigenación del medio, rugosidad del material de relleno, composición del biogás, temperatura, pH, contenido de nutrientes, etc., la forma más correcta para la elaboración de un proyecto de este tipo es con la construcción de una planta piloto.

El espesor de un lecho para este tipo de filtro es de 1 a 4 m., para el material el soporte. La relación área volumen del medio filtrante es de 80-200 $m^2/m^3$. Las cagas superficiales varían entre 20-100 $\frac{m^2}{m^3}.h$. Los tiempos de retención del biogás en el medio filtrante esta en el orden de 1-3 min, [33].

Para los biofiltros el lecho filtrante es el hábitat de la población microbiana. Considerando el volumen de estos sistemas es recomendable considerar materiales de gran disponibilidad en el sitio de operación así como un bajo costo. En general, se prefiere que los materiales filtrantes contengan los nutrientes necesarios para el metabolismo microbiano, sin embargo en ausencia de estos pueden adicionarse mediante solución de nutrientes. Esta solución puede contener fertilizante, biol o parte de la biomasa que se aprovecha en los digestores.

El material filtrante debe tener una buena capacidad de retención de agua, ya que los microorganismos requieren de una importante cantidad de agua para crecer. El rango óptimo de humedad del material filtrante en sistemas de biofiltración se considera entre 40 y 60%. Un bajo contenido en el lecho filtrante reduce el espesor del biofiilme y merma la actividad microbiana y, por consiguiente, la actividad del biofiltro. Por otro lado, un elevado contenido de humedad puede crear una saturación, provocando zonas anaeróbicas o incrementar la caída de presión

Finalmente, el pH de estos sistemas debe ser regulado ya que numerosos procesos de oxidación generan productos ácidos, básicos o inhibidores, como los compuestos clorados, azufrados y amonio entre otros. En general la capacidad

amortiguadora se logra mediante la adición de compuestos tales como carbonatos de calcio o como conchas de ostión.

#### 4.3.1.7.4. FILTROS BIOLAVADORES.

Estos filtros consisten en un compartimiento biolavador y otro de regeneración. El primero es una columna atomizadora de una suspensión de las bacterias degradantes de los contaminantes en agua, en el cual las gotas de agua fluyen en contracorriente con el biogás a purificar. En esta etapa existen una constante transferencia de masa contaminante y de oxigeno hacia una fase liquida. La tasa de transferencia de masa de un compuesto dado está determinado por el producto de coeficiente total de transferencia, por el área total de contacto en columna y gradiente promedio de concentración (la diferencia entre la concentración de equilibrio y la concentración del compuesto en la fase liquida). El mezclado por agitación o aireación es necesario para prevenir la sedimentación microbiana.

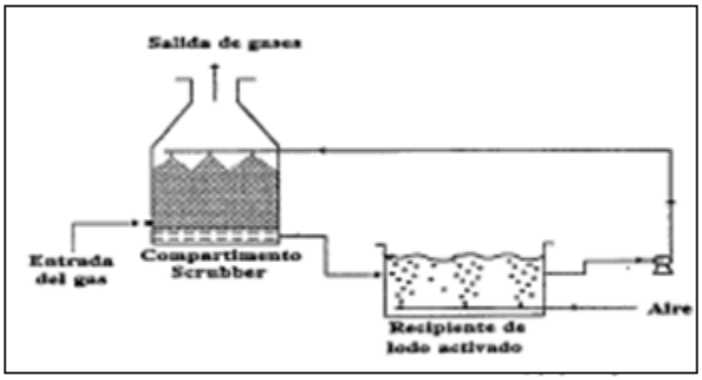



**Figura 4.30. Diagrama del proceso de biofiltración de un filtro biolavador**

Este tipo de lavadores de biogás operan con pocas pérdidas de presión. Como agua de lavado se utiliza parte del biol que se descarga del digestor. También se puede utilizar una mezcla de agua con urea como nutriente. El biogás entra al lavador

por una abertura ubicada en la parte inferior pasando por un lecho formado por pedazos de plástico en donde son absorbidas las moléculas de $H_2S$ o disueltas en el líquido acuoso, [33].

Estos pedazos de plásticos bifurcados también el biogás en varias líneas de flujo. Después el biogás es rociado con la mezcla de agua con biol pasa por un filtro eliminador de gotas de líquido. La velocidad de paso del biogás es de aproximadamente 0,6-1,2 m/s. las gotas que se forman son menores a 1,00mm, por lo tanto la malla de este filtro debe tener una separación de 1mm. El tiempo de retención del biogás en el lavador debe ser máximo de 2-3min. El efluente que se produce en estos filtros debe ser tratado antes de su eliminación, [33].

#### 4.3.1.7.5. FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO

El carbón GAC se fabrican a partir de cualquier material carbónico como la madera, el carbón mineral, la cascara de coco, etc., el cual es clasificado según el tamaño, carbonizado y activado para crear la enorme área de superficie y la estructura interna del poro que define al carbón activado. La vida de servicio depende del tipo de carbón, de los contaminantes afluentes, de la capacidad de flujo, del tiempo de contacto, del diseño del sistema, etc. El carbón activado desgastado puede ser reciclado algunas veces para uso futuro en sistemas correctivos o puede ser reactivado en el sitio según se requiera para reuso en el sitio si el uso de la aplicación garantiza el costo del sistema.

El carbón activado está asociado con la absorción, un proceso físico en cual las moléculas disueltas se adhieran a la superficie del filtro de carbón. Cuando se usa solo, la filtración por carbón activado elimina cantidades muy pequeñas de hidrogeno, generalmente concentraciones bajo 0,3 mg/l. Sin embargo, el carbón activado tiene

una capacidad limitada de absorber sulfuro de hidrogeno. Después que se satura el filtro, el carbón activado debe ser reemplazado, no revitalizado, [33].

El área superficial de los granos de carbón activado es fundamental para la determinación de la capacidad de absorción. Las velocidades superficiales están en el orden de 0,13 al 0,18 m/s. el área de superficies (AS) del carbón activado varia de 500 a 2500 $m^2$/gr, de material, dependiendo de la materia prima y del proceso de activación. El grado típico de carbón para la purificación de biogás tiene un área de superficie de 1000 $m^2/gr$, [33].

La NSF International y la American Wáter Works Association (AWWA) han establecidos estándares para el carbón activado y la American Society For Testing and materiales (ASTM) han escrito métodos de prueba para permitirle uno comparar la actividad (área de superficie o numero de yodo), la densidad, el tamaño de la malla, la humedad, la ceniza, la resistencia a la abrasión y otros parámetros aplicables a las especificaciones del carbón.

Para la mayoría de los sistemas de purificación de $H_2S$ el GAC se utiliza en una operación de columna y la corriene del biogás se pasa a través de la cama de GAC en un flujo descendente o, en situaciones especiales, en el modo de flujo ascendente. El GAC típico es de 350 a 500 kg/$m^3$, dependiendo de si fue fabricado a partir de carbón mineral o cascara de coco, y su tamaño es de 8x30 o de 12x30 US malla (12x30 quiere decir que el 90% del GAC es más grande que una malla #30 y más pequeño que una malla #12; un 5% puede ser más grande que una malla 12 y un 5% más pequeño que una malla 30). [33].

**Cuadro 4.14 Características de los carbonos activados**

| Precursor | Denominación | Porcentaje activación | Área superficie ($\frac{m^2}{gr}$) |
|---|---|---|---|
| Cuezo de palma africana | $CAC_u$ | 18 | 274 |
| Cascara de coco | $CAC_o$ | 21 | 282 |
| Carbón mineral | CAM | 28 | 435 |
| Cascarilla de café | CACf | 24 | 338 |
| Bagazo de caña | CAB | 23 | 385 |

**Fuente: Revah S., Pérez F. y Auria R.1996**

Se deben tomar en consideración varios factores al diseñar un sistema de adsorción de GAC: las características del biogás, contenidos de $H_2S$, el volumen de flujo, el tiempo de contacto, la profundidad de la cama de GAC, la temperatura del biogás, el pH, los porcentajes de eliminación del $H_2S$, un solo absorbente o en serie, la caída de presión, el procedimiento de muestreo, los requerimientos del pre-filtro, el retro-lavado, y los costos de operación.

- Capacidad de flujo $m^3/h$, valores promedio picos.
- Horas de operación (h/d)
- Características del biogás, contenido de $H_2S$ en mg/l o ppm.
- Requerimiento del efluente límites permitidos.
- Temperatura del biogás (los filtros de carbón activado funcionan óptimamente a 4-32°C)
- pH del biogás (el GAC funciona mejor a un pH de 4-10)
- Pre-tratamiento disponible, tratamiento biológico, ajustes de pH, etc.

Para la construcción de los filtros de carbón activado se debe utilizar materiales no corrosivos como acero inoxidable, HDPE, PVC, fibra de vidrio, etc.

Los filtros se pueden diseñar en serie o paralelo. Los sistemas en paralelo se aplican en el caso de que el flujo que a tratar sea muy elevado, o en aquel en el que la caída de presión en un solo equipos, fuera a ser muy grande. Con un sistema en paralelo, la potencia de bombeo, compresión o ventilación es menor.

Las columnas son iguales entre sí, se distribuyen con una separación uniforme, reciben la misma alimentación y la descarga en un cabezal común. Estos sistemas también se utilizan cuando resulta más práctico o económico el uso de dos o más columnas de menor diámetro que el de una sola.

En los sistemas en serie, el efluente de una columna es el afluente de la siguiente. Su operación permite una alta pureza en el efluente y el aprovechamiento de toda la capacidad del carbón utilizado. Cuando se ha saturado el carbón de la primera columna con carbón fresco al final de la serie. Los costos de operación de estos sistemas suelen ser menores que para los sistemas de una sola columna o los sistemas en paralelo que traten el mismo fluido.

Un sistema combinado serie paralelo; como los que se muestran en la figura 4.31, tiene las ventajas de mayor eficiencia de los sistemas en serie como las de baja caída de presión y practicidad de los sistemas en paralelo.

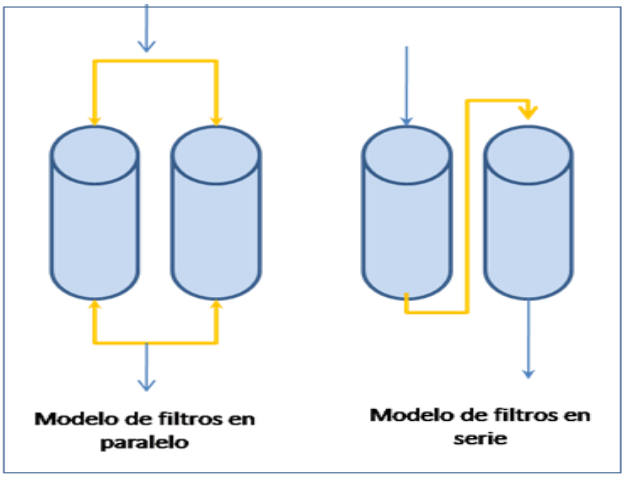



**Figura 4.31. Formato de filtros en serie o paralelo**

- BASES TECNICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO.

Las características catalíticas del carbón activado ocasiona una división de las moléculas de $H_2S$ en base a la siguiente ecuación, [33].

$$O_2(aq) + 2O_-(aq) \text{ asi como } H_2S + HS_- + H_+ \quad (24)$$

Si es que el $H_2S$ entra en contacto con un $O_-$ Ion se forma agua y azufre elemental, [33].

$$HS_- + H_+ + O_- \rightarrow S + H_2O \quad (25)$$

El azufre elemental es adsorbido por carbón activado.

Las cargas de aplicación de $H_2S$ por kg de carbón activado son de 0,2 hasta 0,5 $\frac{kgH_2S}{kg}$ carbón activado, [33].

Cuando se alcance esta carga se debe recambiar el carbón activado. Una de las ventajas de la remoción del $H_2S$ por el carbón activado es que también remueve compuesto siloxanos y halogenados contenidos en el biogás.

La cantidad de reposición del carbón activado en base a la siguiente expresión, [33].

$$M_{ca} = \frac{24xM_s x\left(H_2SxpH_2SxV_{biogas}x10^{-6}\right)}{(K_{ca}xM_{H_2S})} \quad (26)$$

En donde

$M_{ca}$: Consumo de carbón activado (kg/día)

$K_{ca}$: Carga permisible de $H_2S$ por kg de carbón activado (0,2-0,5) ($\frac{kgH_2S}{kg_{ca}}$)

$M_s$: Masa molecular azufre (=32) (g/mol)

$M_{H_2S}$: Masa molecular $H_2S$ (=32,08) (g/mol)

$\rho H_2S$: Densidad de $H_2S$ (mg/ml)

La densidad del $H_2S$ para una presión de 20 mbar (=20 hPa=2000Pa) y 35°C (=273,15 °K + 35) es de $\rho H_2S$ = 1,371 gr/l.

$H_2S$: Sulfuro de hidrogeno reducido en el biogás (ppm) (diferencia de medición antes y después del filtro de carbón activado = $V_{biogas}$ Volumen del biogás a purificar ($m^3/h$).

Una de las desventajas de los filtros de carbón activado es que no se puede regular el flujo en el interior del filtro y que después de que se haya saturado el carbón hay que cambiarlo.

#### 4.3.1.7.6. Filtros de limaduras de Hierro

Uno de los métodos más antiguos es la utilización de hierro (Oxido de hierro (II)) mezclados con virutas de madera. Este es un proceso económico que puede utilizarse en instalaciones pequeñas. No requiere de mucha inversión, es de bajos costos operativos. Las limallas o esponjas se combinan con virutas de madera en proporciones de 60% y 40% respectivamente. La capacidad de eliminación de las columnas es de 0,12 -0,18 $\frac{kg\ S}{kg\ Fe}$, siendo la duración de dichas columnas de dos meses para un tiempo de contacto de tres minutos y una concentración de sulfuro de hidrogeno en el gas de 0,3% en volumen, [33].

Este método tiene como desventajas, que cuando se quiere eliminar grandes cantidades de sulfuro de hidrogeno, el costo de la mano de obra resulta excesivo, así como, la cantidad de limallas es difícil de obtener. Se han ideado procedimientos para regenerar el oxido sin moverlo, adicionando aire en forma continua a la corriente que se quiere purifica, o circular de nuevo gas en aire sobre las capas de oxido, pero esto solo ha enriquecido mas el proceso debido a la necesidad de utiliza grandes columnas para la purificación del gas.

Otro de los procedimientos empleados para absorber el sulfuro de hidrogeno, consiste en la utilización de soluciones de aminas, las cuales tienen el grupo amino ($NH_2$) que se combina con dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno para dar compuestos de hidrogeno carbonato, amoniaco $(RNH_3)HCO_3$ y azufre con amoniaco $(RNH_3)S$, pero tiene la dificultad de ser un método muy costoso.

En la columna tipo ducha se emplea soluciones de carbonato (carbonato de potasio o sodio), en ellas se logra reducir el sulfuro de hidrogeno y aunque es un proceso menos costoso que el anterior; también se han empleado las soluciones acuosas alcalinas. Su principal ventaja consiste en que los problemas de corrosión y formación de espuma lo hacen menos costoso. Sin embargo, el agente antiespumante hace que el equipamiento y la operación sean más complicados. Este método consume mucha energía para el bombeo de la solución y los gases.

Las características principales del proceso reactivos sólidos basados en Oxido de Hierro.

- Transforma el $H_2S$ en $F_eS_2$ (pirita)
- Rango usual: 0,3-500 $\frac{kg}{d}$ de $H_2S$.
- $H_2S$ entrada: 100% vol.
- $H_2S$ salida: o-1 ppmv.

- Instalaciones mínimas.
- Alta selectividad.
- Gran flexibilidad operativa.
- No requiere supervisión / servicios.
- Reactivo consumido no peligroso.
- Disposición final simple.

Los grados de contenido de $Fe_3O_4$ son de 100, 140, 190, 240 y 320 kg $Fe_3O_3$. La densidad del material es de 800 $\frac{kg}{m^3}$. [33].

La reacción química que ocurre el proceso de oxidación se expresa en las siguientes ecuaciones. [33].

$$2Fe_2O_3H_2O + 6H_2S \rightarrow 2Fe_2S_3 + 6H_2O\ 22\frac{kJ}{g-mol}\ H_2S \quad (27)$$

$$2Fe_2S_3 + 3O_2 \rightarrow Fe_2O_3H_2O + 6S\ 198\frac{kJ}{g-mol}\ H_2S \quad (28)$$

Las dos reacciones son exotérmicas. La primera produce 22,1 kJ por mole $H_2S$ y 197,3 kJ por mole $H_2S$ respectivamente. Estas reacciones ocurren a temperaturas menores a 48,8 °C y un pH sobre 7,0.

A temperatura mayores a 50°C, se deshidratan el oxido de hierro reduciendo la capacidad de oxidación. Bajo condiciones acidas el $Fe2S_3$ se descompone a $FeS_2$ y $Fe8S_9$. El $FeS_2$ se oxida lentamente a la forma activa y el $Fe8S_9$ no se puede oxidar, [33].

Como se aprecia en la ecuación anterior 1kg de $Fe2O_3$, remueve 0,64 kg de $H_2S$. Si se considera un grado de eficiencia de 85% se puede alcanzar una remoción de 0,56 $\frac{\text{kg } H_2S}{\text{kg } Fe2O_3}$. Las tasas de remoción de este tipo de filtros están en el orden de 2,5$\frac{\text{kg } H_2S}{\text{kg } Fe2O_3}$. [33].

Las esponjas se pueden regenerar recirculando aire con un contenido de oxigeno del 8% por los tanques y 0,3-0,6 $\frac{\frac{m^3}{m^3 bed}}{\text{min}}$ velocidad de carga. No se recomienda la regeneración de las esponjas una vez del filtro debido a los peligros de encendido o explosión, [33].

El porcentaje de aire que se requiere para la recirculación es igual a 1,90 + $\frac{\frac{mg}{m^3 H_2S \text{ medido}}}{3024}$. [33].

A continuación se presenta algunos parámetros para el dimensionamiento y diseño de este tipo de filtros.

- Para la construcción de los tanques de remoción de $H_2S$ se utilizan tanques de acero inoxidable, de PVC o fibra de vidrio para evitar corrosión. Se utilizan generalmente 2 tanques en paralelo.

- El biogás debe circular en forma descendente para mantener la humedad en las esponjas.

- El tiempo de residencia debe ser de aproximadamente 1-2 minutos.

- La temperatura debe mantener entre 18°C y 46°C. La altura de los tanques debe ser de aproximadamente 3 hasta 6m. La velocidad superficial de carga se debe mantener entre 0,6-3 $\frac{\text{m}}{\text{min}}$. La carga orgánica debe mantener bajo 10 $\frac{\frac{\text{as}}{\text{min}}}{\text{m}^2}$lechos.

- La cantidad de humedad debe ser de aproximadamente, 40% y una variación más o menos del 15%. El pH se debe mantener entre 8-10,2. La presión interior debe ser de aproximadamente 140 kPa (1,4 bar o 1400mbar).

- OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

La reacción química solo es posible en presencia de humedad, por lo que el medio filtrante debe estar siempre húmedo, a riesgo de perder su actividad de forma permanente si se seca. La temperatura, a riesgo de perder su reactividad de forma permanente si se seca. La temperatura debe ser moderara, para permitir una eficiencia aceptable. El medio debe mantenerse alcalino, lo que puede requerir aditivos para corrección de pH. La velocidad debe estar entre límites definidos. Una baja velocidad puede disminuir la turbulencia del flujo de biogás hasta causar un pobre contacto entre el mismo y el reactivo, con pérdida de eficiencia. Una velocidad elevada aumentara la perdida de carga, y reducirá el tiempo de contacto por debajo del mínimo necesario para la reacción del 1,4 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ (manométrica), pues por debajo de este limite la reacción se vuelve muy poco predecible.

Los principales problemas del proceso con esponja de hierro, que han llevado a desarrollar productos alternativos, son operativos; el proceso es en algunos casos difíciles de predecir, y la remoción y disposición del producto usado es complicada y

potencialmente peligrosa, por lo que se debe adoptar precauciones especiales. El producto, en operación, se compacta bastante. Ello, sumado a que las virutas de madera se "sueldan" entre sí con los subproductos de la reacción (sulfuro de hierro y azufre), hace que al final del ciclo de operación, la masa de producto dentro del recipiente forme un sólido aglomerado que exige mucho trabajo para desmenuzar y remover.

El azufre extraído del gas se transforma principalmente en FeS (sulfuro de hierro). Este compuesto se oxida muy rápidamente en condiciones atmosféricas, volviendo el hierro a oxido, y el azufre como azufre elemental. Esta reacción es exotérmica. Cuando se remueve el producto del recipiente, se debe retardar el contacto del mismo con el aire, pues la reacción de oxidación produce un aumento de temperatura tal, que puede producir quemaduras o la combustión espontanea del material, que es de madera y puede estar impregnada con hidrocarburos líquidos. La forma de evitar esto es inundar el recipiente con agua, y luego remover el material rociando con agua permanentemente. Cuando el material se ha sacado de la torre, se lo debe esparcir en suelo inerte, y se lo debe remover a intervalos regulares, sin dejar que se seque. La velocidad linear se la debe mantener entre 0,6 y 3 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{min}}$. La velocidad de carga debe ser de alrededor de 250 $\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^3}$ de filtro. Si se tiene concentraciones mayores de biogás que sobrepasan los 100 ppmv se recomiendan una velocidad de carga de máximo 100 $\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^3}$. [33].

- CARGA SUPERFICIAL DE SULFURO DE HIDRIGENO.

El diámetro del tanque del filtro debe seleccionarse de tal forma que la carga superficial de sulfuro de hidrogeno sea menos a $10\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{m}^2\mathrm{min}}$. La conversión de $H_2S$ y

$Fe2O_3$ a $Fe_2S_3$ así como la reacción reversa produciendo azufre elemental es altamente exotérmica. Esta reacción libera 219,5$\frac{kJ}{mol\ H_2S}$ (94.500 $\frac{BTU}{lbmol\ H_2S}$). [33].

Otro parámetro de diseño es R definido como la máxima cantidad de biogás que es procesada en una hora dividida para el volumen de filtro. Este valor debe estar entre 20-50 $\frac{m^3\ biogas}{h\ m^3}$. La temperatura de trabajo dentro del filtro no debe exceder los 40°C. Temperaturas más altas secan el medio filtrante lo que reduce la eficiencia de remoción. Se debe utilizar materiales de construcción no corrosivos como acero inoxidable 316L o 320, HDPE y/o fibra de vidrio reforzada. La alimentación se le realiza por medio de un blower que suple las pérdidas de carga en el filtro. Estas pérdidas de carga están en el orden de 20-30 mbar. Estas muestras de presión y otras son tomadas como se indica en la figura 4.32. [33].

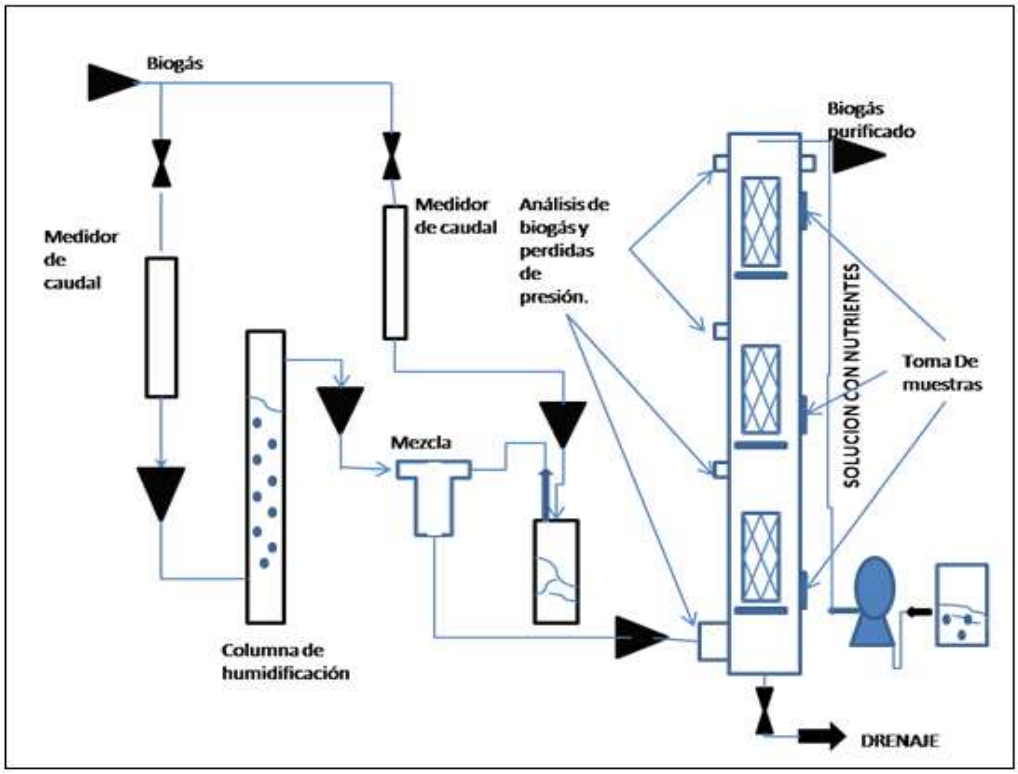



**Figura 4.32. Alternativa de filtro de limaduras de hierro**

#### 4.3.1.8. Tanques de almacenamiento de Biogás

El volumen de almacenamiento de biogás, si se trata de digestores con cúpula de membrana, se calcula en base a la producción de biogás y los consumos horarios de los generadores de energía eléctrica. En algunos proyectos se almacena parte del biogás en el digestor y aparte se construyen tanques de almacenamiento para guardar el biogás que no se consume durante el día. En el caso de los digestores de membrana se debe prever como mínimo un volumen de almacenamiento que cubra la producción de biogás de por lo menos 4 horas. Es mejor la selección de un volumen mayor, pero incidirá de la producción de biogás, consumo y volúmenes de almacenamiento.

Para el cálculo matemático del volumen de almacenamiento de biogás se dispone de varios métodos. El más usual es el que se basa en la curva de masa acumulada de producción y consumo.

- METDODO ANALITICO PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE REGUALCION NECESARIO.

Para el cálculo del volumen requerido se deberá conciliar las leyes de producción de biogás y de demanda para los generadores. El volumen requerido será la suma de los valores absolutos del máximo excedente y el máximo déficit multiplicada por el consumo máximo diario. En caso de o disponer del comportamiento de la demanda, se utilizara la ley de demanda expresada como porcentajes horarios del volumen o gasto horario en el día máximo consumo.

#### 4.3.1.9. Sistema de generación de energía eléctrica y calorífica

El cálculo de la potencia para la instalación de un generador de energía eléctrica se lo presenta en el siguiente procedimiento:

1. Estimación de la producción de biogás.
2. Establecer el potencial calórico K
3. Porcentaje de gas metano contenido en el biogás.
4. Producción de gas metano $CH_4$ en $m^3/dia$.
5. Estimación de la eficiencia de producción de energía eléctrica del motor y generador, $\mathcal{E}_{\text{Par M.G}}$
6. Producción especifica de biogás por $m^3$ de gas metano.

Producción diaria de electricidad

$$\mathcal{E}_{\text{Par M.G}} = \mathcal{E}_{\text{Motor}} * \mathcal{E}_{\text{Gener}} \tag{29}$$

$$E = CH_4 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) * \text{K} \left( \frac{\text{kW} * \text{h}}{\text{m}^3} \right) * \mathcal{E}_{Par\ M.G} \tag{30}$$

$$P = {}^{E\ kWh}/_{24\ h} \tag{31}$$

Se asume 24 horas de operación.

Dimensionando con el 15% de seguridad se obtiene una potencia a instalar de:

$$\text{P}_{\text{total}} = \text{P x } 1{,}15 \tag{32}$$

- DATOS REQUERIDOS PARA EL CÁLCULO

Producción de biogás en los digestores. Este valor debe ser calculado muy eficazmente y en base a datos confiables. Este valor debe indicar la producción real que se va a obtener en la planta de biogás.

a) Grado de eficiencia total del modulo de generación, incluye eficiencia del motor y generador. Por lo general este porcentaje de eficiencia bordea el 85%.

b) Porcentaje de gas metano contenido en el biogás. En caso de que se utilice vario tipos de biomasa, se debe calcular el valor promedio de % de metano de la mezcla de biogás. El porcentaje se le calcula considerando el volumen de biogás que produce cada biomasa y su respectivo % de gas metano. El % de gas metano es de aproximadamente 55-75%.

c) Grado de eficiencia eléctrica del generador. Este valor es de máximo 35% y puede variar entre el 30-35%. Este coeficiente debe ser verificado posteriormente durante la adquisición del generador.

d) Es recomendable que el generador que se instale sea en un 20% de mayor potencia que la calculada para el generador. De esta manera la unidad de generación tendrá más potencia para cubrir picos de demanda de energía durante el día.

e) Para la estimación de la potencia a instalar hay que considerar las horas diarias de operación. Se ha tomado en consideración para el efecto del presente trabajo de tesis una estimación de 24 horas.

f) Para la producción de la energía eléctrica en kWh/año hay que considerar las horas reales de operación (factor planta). Se debe restar las horas de mantenimiento y eventuales fallas en el sistema.

#### 4.3.1.10. Antorchas

Las antorchas para quemar el biogás se dimensionan para el volumen de exceso de biogás o para la quema total del mismo. Para el caso preciso de generación de energía eléctrica se debe evitar a lo máximo la combustión de biogás en antorchas.

Generalmente para los periodos de mantenimiento de los generadores se dispone de un generador stand by de emergencia que entra en operación cuando uno de las unidades esta en mantenimiento.

Para determinar el volumen $Q(\frac{m^3}{h})$ que debe quemar la antorcha se debe analizar los volúmenes de producción de biogás, el mantenimiento de los consumos de los generadores o calderas. Solamente el caudal de biogás que realmente es excedente y que no se puede aprovechar en los generadores o almacenar se debe quemar. Por razones de seguridad se debe asumir un coeficiente de mínimo 20% para la estimación de la potencia requerida de las antorchas, [30].

**FASE IV DISEÑAR LA PLANTA DE GENERACIÓN DE POTENCIA A TRAVÉS DEL SOTWARE BioDigestor©, A FIN DE CARACTERIZAR EL DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA.**

**Actividades:**

### 4.4.1. Instalación efectiva del software

El programa BioDigestor© es una aplicación que utiliza la tecnología de 32 bits. Por lo tanto, para su funcionamiento es necesaria una PC con un sistema operativo de 32 bits, por ejemplo Windows XP o Vista. Para instalar BioDigestor©, se deben seguir los siguientes pasos:

- Hacer doble clic en el archivo Instalador_BDG (este es el instalador o setup) que se ha descargado previamente desde el enlace en internet www.aqualimpia.com/PDF/Instalador_BDG.zip). Windows desplegará el menú de inicio.

- Seguir las instrucciones del programa de instalación, éstas son intuitivas.

- Después aparecerá el cuadro de diálogo, **"*SELECCIONE DIRECTORIO*"**; este cuadro de diálogo sirve para indicar la dirección donde el usuario desea instalar la aplicación en su PC. Por defecto, aparece; **C:\Archivos de programa\Biodigestor.**
- Hacer clic en el botón aceptar. En este momento, el instalador copiará todos los ficheros de la aplicación al directorio de destino de su disco duro.

- Luego hacer clic en la tecla finalizar, para terminar la instalación del software.

- Una vez finalizada la instalación verificar que se encuentre un acceso directo al programa en el escritorio de su PC. Hacer doble clic en éste y comprobar que el software funciona correctamente.

### 4.4.2. Construcción del modelo de la planta de generación de potencia.

En este parte del trabajo de investigación se describen los parámetros utilizados para el diseño de la planta, que garanticen un cálculo aproximado de la producción de biogás, así como la obtención de energía eléctrica y calorífica que puede generarse, mediante el aprovechamiento del mismo.

A continuación se presentan cada uno de los criterios seleccionados para la construcción del modelo de la planta de generación de potencia, basados en argumentos técnicos, científicos y ambientales.

- El tipo de biomasa que se utilizará para la producción de biogás será estiércol de ganado bovino; si bien éste no es el que tiene mayor eficiencia a la hora de producir biogás, el estiércol de vaca es uno de los más equilibrados, y tiene la ventaja que por animal, se produce una gran cantidad de biomasa, es de fácil recolección y en el Municipio Ribas del Estado Guárico, lugar donde se desarrolla esta investigación, se cuenta con un gran potencial de este tipo de biomasa, en comparación con la gallinácea, porcina, equina, etc. Según el Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral (INSAI), para el año 2008 este municipio contaba con 436 fincas destinadas a la ganadería extensiva de doble propósito como se puede ver en la tabla 4.15.

**Tabla 4.15: Numero de fincas inventariadas en el estado Guárico**

Vice - Ministerio de Economía Agrícola
Oficina de Análisis Estratégico
Dirección de Estadística

Gobierno Bolivariano de Venezuela
Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD AGRÍCOLA INTEGRAL (INSAI)

UBICACIÓN Y NÚMERO DE FINCAS INVENTARIADAS EN EL ESTADO GUÁRICO

| CODIGO | MUNICIPIO | PARROQUIA | NRO. FINCAS |
|---|---|---|---|
| 120201 | Chaguaramas | Chaguaramas | 51 |
| 120301 | El Socorro | El Socorro | 171 |
| 120501 | Infante | Valle de la Pascua | 399 |
| 120502 | Infante | Espino | 274 |
| 120601 | Las Mercedes | Mercedes del Llano | 25 |
| 120603 | Las Mercedes | Santa Rita | 9 |
| 120701 | Mellado | El Sombrero | 7 |
| 120901 | José T. Monagas | Altagracia | 2 |
| 120902 | José T. Monagas | Lezama | 1 |
| 120903 | José T. Monagas | Libertador | 8 |
| 121101 | Ribas | Tucupido | 240 |
| 121102 | Ribas | San Rafael de Laya | 196 |
| 121401 | Santa María de Ipire | Santa María | 232 |
| 121402 | Santa María de Ipire | Altamira | 2 |
| 121501 | Zaraza | Zaraza | 608 |
| 121502 | Zaraza | Onoto | 16 |
| | | Total | 2241 |

**Fuente: Instituto Nacional de Salud Agrícola Insai (INSAI)**

- El número de animales para la estimación de la biomasa disponible se determinó de acuerdo a las estadísticas de la zona, obtenidas por medio del Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral (INSAI), Ver tabla 4.16.

**Tabla 4.16: Numero de fincas inventariadas en el Municipio Ribas**

Vice - Ministerio de Economía Agrícola
Oficina de Análisis Estratégico
Dirección de Estadística

Gobierno Bolivariano de Venezuela
Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD AGRÍCOLA INTEGRAL (INSAI)

NÚMERO DE FINCAS INVENTARIADAS EN EL MUNICIPIO RIBAS DEL ESTADO GUÁRICO

| NRO DE ANIMALES | NRO DE FINCAS | NRO DE HECTAREAS | PORCENTAJE |
|---|---|---|---|
| <50 | 80 | <120 | 18,35 |
| 50 - 100 | 65 | 120 - 280 | 14,91 |
| 100 -150 | 35 | 280 - 400 | 8,03 |
| 150 - 200 | 32 | 400 - 550 | 7,34 |
| 200 -250 | 19 | 550 - 720 | 4,36 |
| 250 -300 | 13 | 720 - 880 | 2,98 |
| 300 - 500 | 25 | 880 - 1300 | 5,73 |
| 500 -1000 | 22 | 1300 - 2500 | 5,05 |
| 1000- 1500 | 15 | 2500 - 4000 | 3,44 |
| 1500 - 2000 | 63 | 4000 - 5000 | 14,45 |
| 2000 - 2500 | 35 | 5000 - 7000 | 8,03 |
| 2500 - 3000 | 7 | 7000 - 8500 | 1,61 |
| 3000 - 3500 | 9 | 8500 - 10200 | 2,06 |
| 3500 - 4000 | 4 | 10200 - 11600 | 0,92 |
| 4000 - 5000 | 7 | 11600 - 14400 | 1,61 |
| >5000 | 5 | >144000 | 1,15 |
| Total de Fincas | 436 | | |

**Fuente: Instituto Nacional de Salud Agrícola Insai (INSAI)**

En la misma se puede observar que el 14.45% está representado por fincas que cuentan en sus tierras con un número de animales comprendido entre 1500 y 2000 bovinos, lo que significa un valor importante a la hora de tener en consideración la generación de biomasa, ya que según Brian Guzzone, en su trabajo de grado, Resultados del Estudio de Pre-Viabilidad Para la Generación de Potencia a partir de Biomasa dice " para proyectos de gran envergadura utilizando biomasa de ganado vacuno, y que los mismos puedan ser rentables, se debe contar, por lo menos, con el estiércol de 1200 animales"; partiendo de esta premisa podemos descartar los dos porcentajes más altos (18.35% y 14.91%) de la tabla 4.16, que pertenecen a pequeñas fincas que cuentan con un número de animales menor a los requeridos para que el proyecto sea considerado viable.

El número de animales será de 2000 bovinos, ya que de acuerdo a la tabla 4.16 con esta cifra, se garantiza que se beneficiará el mayor número de fincas posible en la zona.

- El peso de cada animal en su edad adulta oscila entre 480 kg a 520kg; para este proyecto se tomará el valor promedio de 500kg, con el fin de obtener un valor de biomasa recolectada lo más real posible.

- El porcentaje de estiércol recogido será 85% del disponible, asumiendo un 15% de pérdidas en la recolección.

- El porcentaje de masa seca en el estiércol de ganado bovino oscila entre 9% y 12%, según la tabla 4.1 para este modelo se tomará un valor de MS igual a 12%.

- El porcentaje de la masa volátil en el purín de ganado vacuno es de 85%, como se puede observar en la tabla 4.1.

- Las temperaturas en esta zona del país son de 27°C la mínima, 30°C la media y 35°C la máxima.

- El porcentaje de masa seca contenida en la mezcla para este tipo de biomasa, es de 10% a 12%; para este modelo la tasa de dilución seleccionada será del 10%. Es decir la mezcla con que se alimentará el biodigestor estará compuesta por 10% de biomasa y 90% de agua

- El porcentaje de MV resistente a la degradación biológica utilizado en el presente modelo, será el recomendado en el programa BioDigestor©, igual a 6%. Este valor oscila en un rango de 4% a 6%, en biomasa proveniente de ganado bovino.

- El coeficiente de decaimiento de la degradación de la materia orgánica k a utilizar será de 0.06 c/día, dicho coeficiente refleja el decaimiento en la producción de biogas a causa del agotamiento de algún nutriente por acumulación de inhibidores. Este valor es el que más se adapta al estiércol de ganado vacuno y es el recomendado por el programa BioDigestor©.

- La implantación de biodigestores será bajo tierra, esto con el objetivo de no entorpecer la vista ni el paisaje de la zona, además de aminorar los costos por hormigón que conlleva la construcción del biodigestor. y también reducir el número de bombas de las cuales dispondrá el sistema, ya que al estar el tanque de alimentación por encima del nivel de los biodigestores el abastecimiento se llevara a cabo por efecto de la gravedad.

- El tanque de alimentación tendrá forma circular y no cuadrada, con el fin de que no se quede atascada la biomasa en las esquinas del tanque, al momento de hacer el mezclado.

- La relación largo-ancho del biodigestor para este modelo será de 1.5, esto con el objetivo de que los agitadores que se colocarán a lo largo del biodigestor no estén tan cerca uno del otro, haciendo el mezclado dentro del mismo de manera eficiente.

- El grado de eficiencia eléctrica depende de la potencia de una unidad de generación, pero no aumenta linealmente con la misma, para generadores pequeños, menores a los 300 Kw la eficiencia eléctrica varía entre 28% y 37%. El valor seleccionado para el modelo de esta investigación será 35%.

- Las horas de operación del sistema serán de 24 cada día con el fin de alimentar constantemente a los usuarios que estén demandando la energía producida.

### 4.4.3. Una vez construido el modelo en el software, se procederá a introducir y/o ajustar los parámetros seleccionados, correspondientes a la planta.

A continuación se muestran las diferentes ventanas que se aprecian en el programa Biodigestor©, para la introducción de los diferentes valores que conforman el modelo de la planta.

En la figura 4.33, se observa dónde se ingresan todos los datos relativos al proyecto, nombre, ubicación, etc. En el área de datos hidrológicos se introducen las

temperaturas del aire (medio ambiente). La temperatura incide en las eficiencias de degradación de los biodigestores. Estos valores tienen que ser colocados obligatoriamente. También se deben registrar los días promedio del año en los que ocurren las temperaturas bajas. Tales datos son importantes para que el software calcule el tiempo de retención hidráulica (TRH). El programa optimiza el TRH también en base a las temperaturas de la biomasa que alimenta al biodigestor.

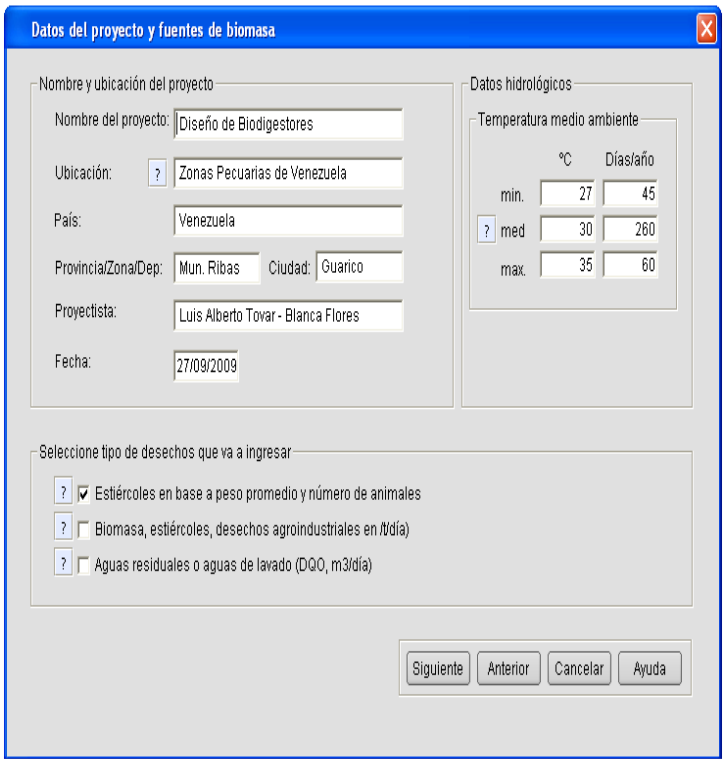



**Figura 4.33. Datos del proyecto y fuentes de biomasa**

En la parte inferior de esta ventana se selecciona el tipo de desechos que va a ingresarse, que pueden ser:

- **Estiércoles en base al peso promedio y número de animales:** Esta opción fue la seleccionada para este proyecto, y se utiliza cuando se conoce el número de animales y su peso promedio.

- **Biomasa, estiércoles, desechos agroindustriales en t/día:** Esta opción se utiliza cuando se conoce la cantidad de desechos que se producen, sean estos estiércoles o biomasa agrícola.
- **Aguas residuales:** Esta opción se utiliza cuando se tienen aguas residuales y se conocen las concentraciones contaminantes, DQO, DBO, etc.

En la figura 4.34, se aprecia dónde se indican los datos que deben ingresarse si se seleccionó la primera casilla, ***"estiércoles en base al peso promedio de animal y el número de animales"***.

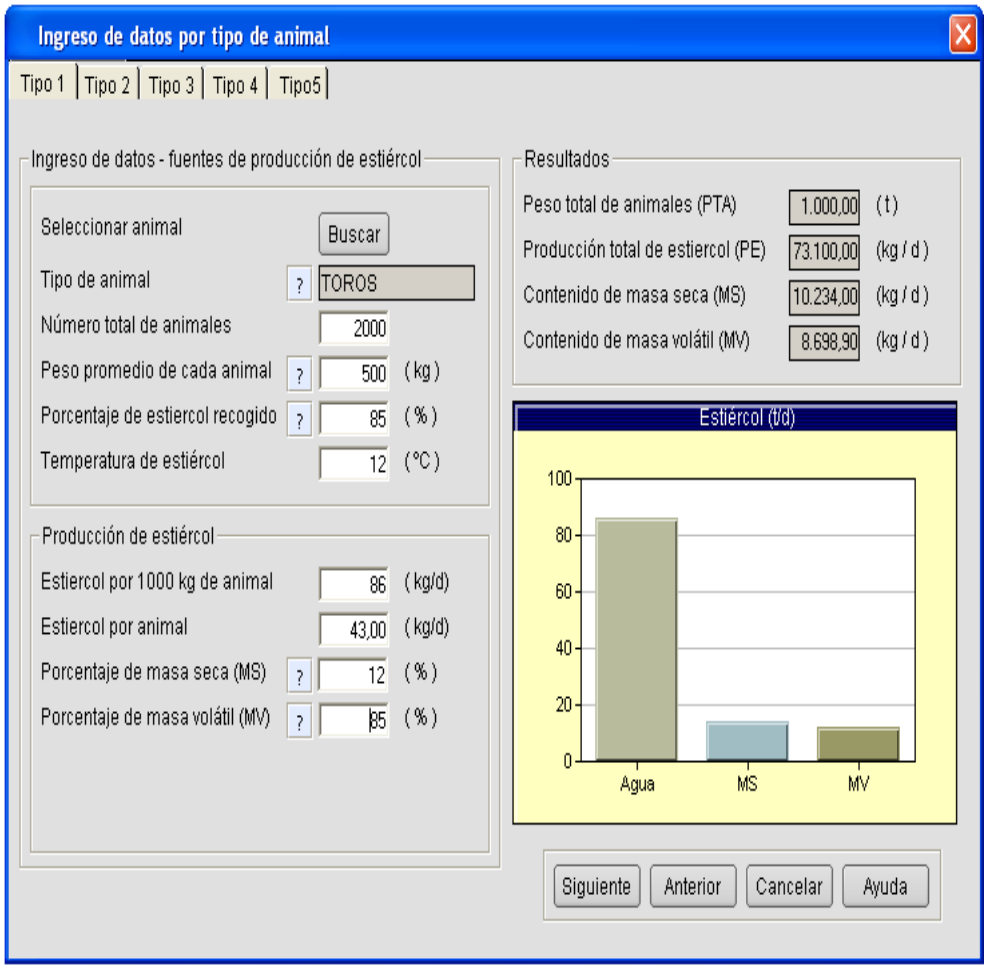



**Figura 4.34. Ingreso de datos por tipo de animal**

Una vez ingresados los datos de tipo de animal, numero y peso promedio del mismo, estiércol por 1000 kg de animal, porcentajes de estiércol recogido, de masa seca y de masa volátil, el programa presenta un resumen de disponibilidad de biomasa como se muestra la figura 4.35, en la que se destacan los valores de producción de estiércol (PE), masa seca (MS), masa volátil (MV), Volumen de biomasa (BM) diario que se producirán para el funcionamiento de la planta.

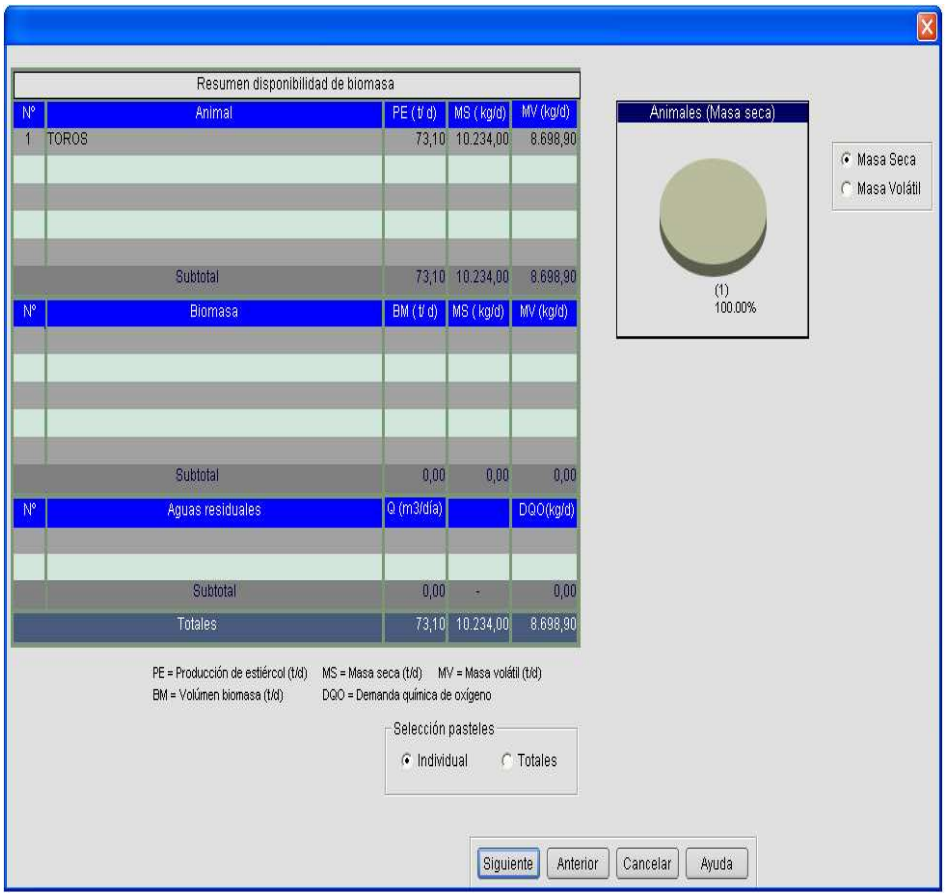



**Figura 4.35. Resumen de disponibilidad de biomasa**

También se muestra en la parte derecha de la misma una grafica de los componentes de masa seca y masa volátil de la muestra de biomasa ingresada por el usuario.

A continuación se presenta una ventana de resultados de dimensionamiento que genera el programa, ver figura 4.36, en ésta el usuario puede modificar el tiempo de retención hidráulica TRH en caso de ser necesario y la tasa de dilución.

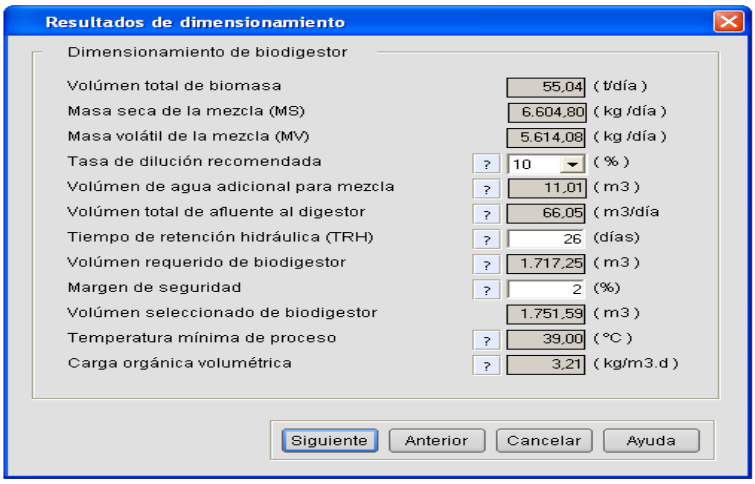



**Figura 4.36. Resultados del dimensionamiento del biodigestor**

En la figura 4.37 se muestra la concentración de masa volátil en el efluente, se considera que nunca se degradara el 100 % de la misma.

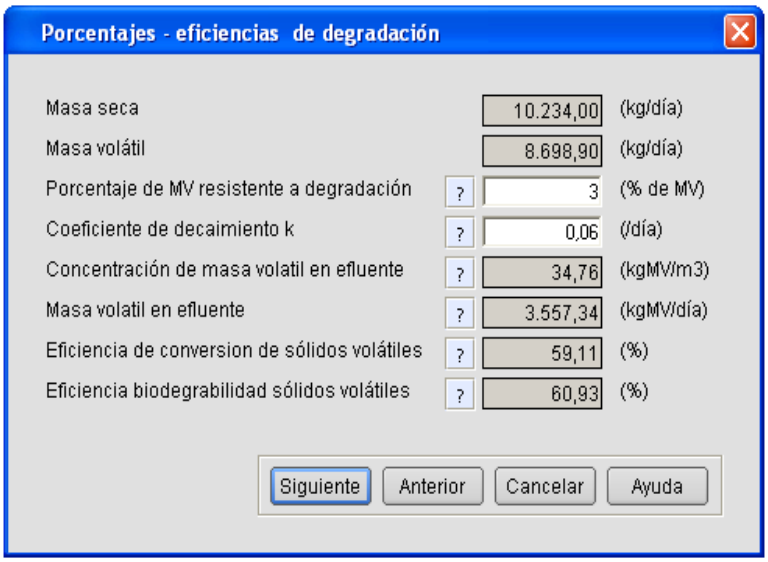



**Figura 4.37. Porcentajes – eficiencia de degradación**

La figura 4.38 muestra los resultados del cálculo de la producción de biogás, también se observa la posible producción de energía eléctrica y calorífica que se lograría aprovechando el biogás generado, y en la parte derecha de la pantalla, se muestran las equivalencias energéticas que se obtendrían del biogás producido en el biodigestor.

En esta ventana el usuario puede variar el porcentaje de contenido de gas metano en el biogás, también se establece la eficiencia eléctrica que tendrá el sistema de generación de potencia a utilizar y el número de horas que estará en servicio la planta.

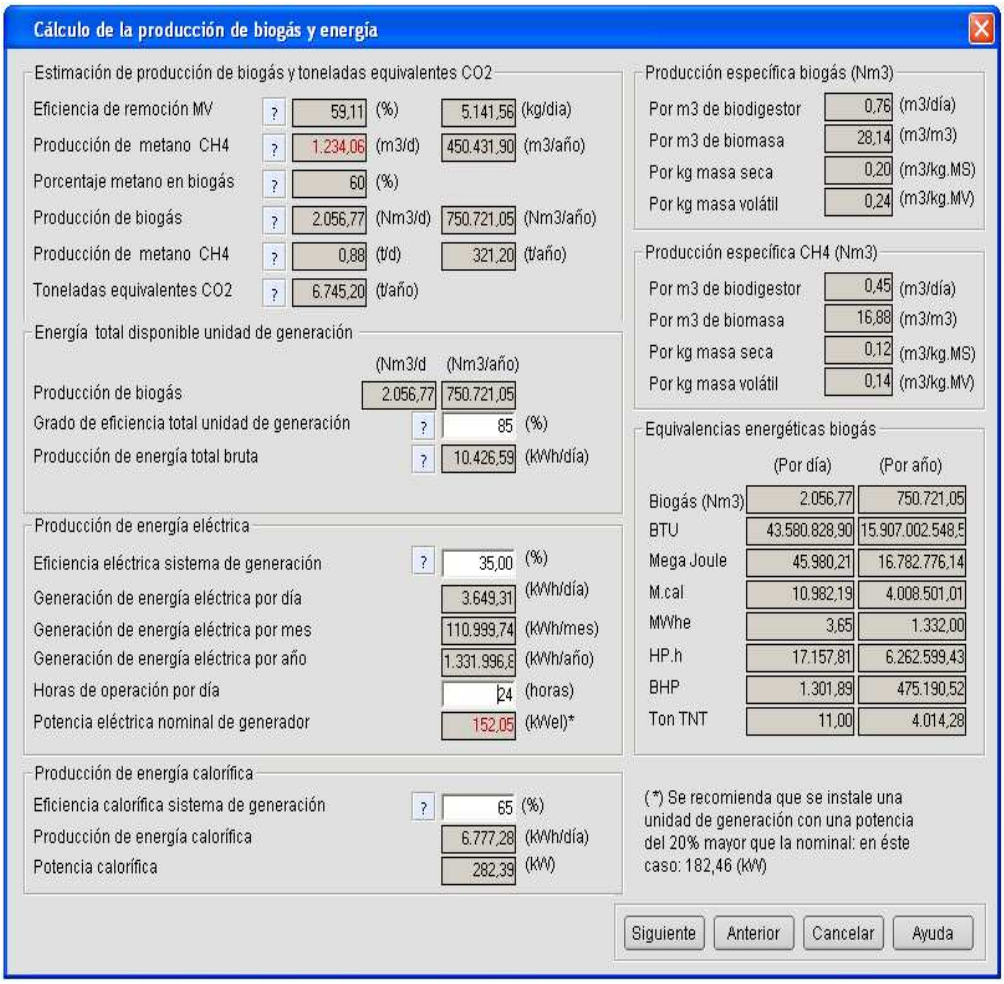



**Figura 4.38. Calculo de la producción de biogás y energía**

En la siguiente ventana se selecciona el tipo de implantación del biodigestor, que será bajo tierra para esta investigación, así como también el número de biodigestores y tanque de alimentación a utilizar en la planta de biogás, (ver figura 4.39).

En la misma se introduce la forma (circular o cuadrada) que deben tener biodigestores, tanque de alimentación y la del tanque de descarga, asignándole a cada uno, un valor de relación largo - ancho, ajustada al criterio del diseñador.

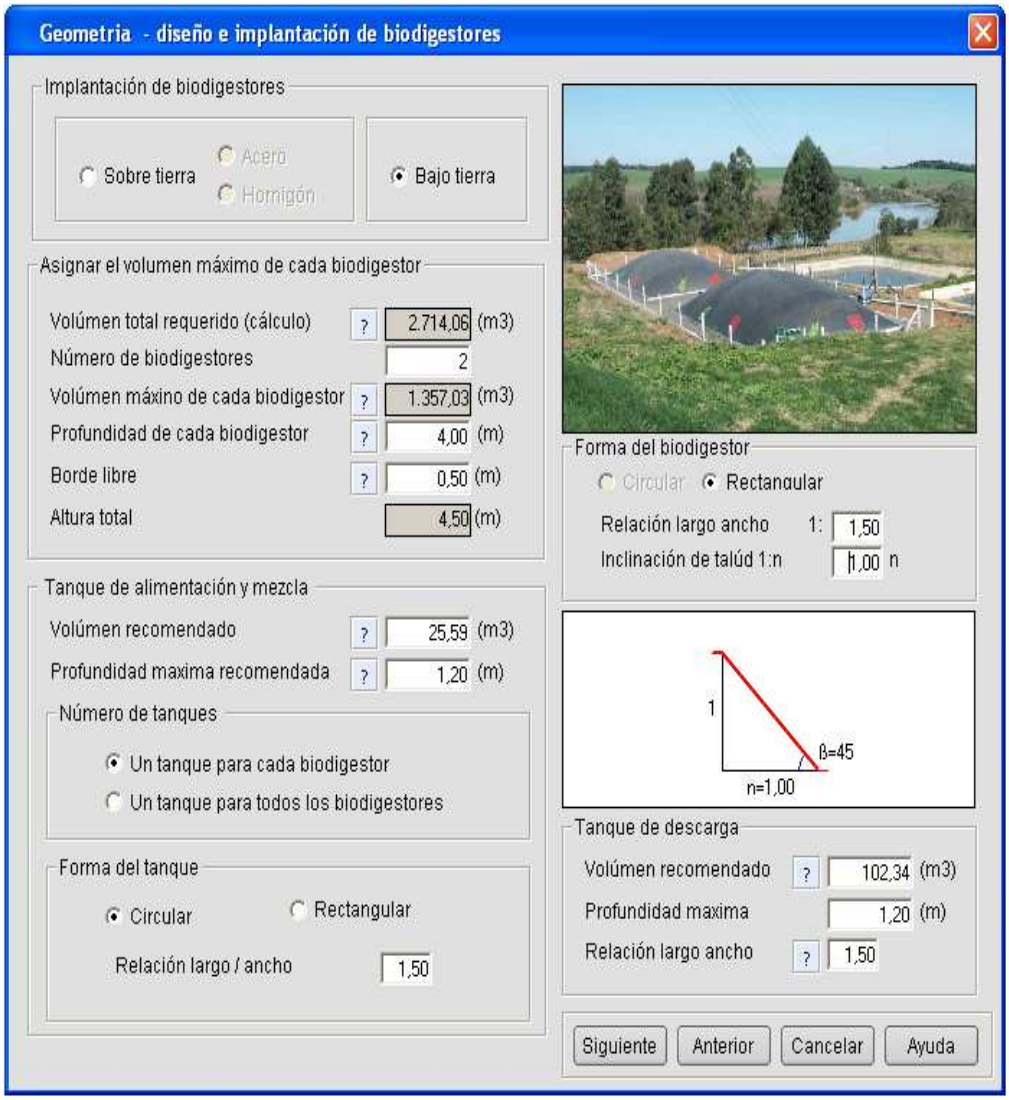



**Figura 4.39. Geometría, diseño e implementación del biodigestor**

**4.4.4. Obtención de resultados. En el caso particular de esta investigación, la información extraída de la simulación es la siguiente.**

**4.4.4.1. Dimensionamiento y diseño esquemático de todas las estructuras de la planta.**

En esta etapa del proceso de investigación, se presenta un diseño de la planta de biogás propuesto por el software BioDigestor© como resultado de la introducción de los datos en el programa. En dicho modelo se especifican todas las dimensiones de los elementos que conforman el sistema.

En la figura 4.40 se pueden observar cada uno de los componentes que integran la planta y las líneas del proceso de generación de biogás (abono, biogás y efluente).

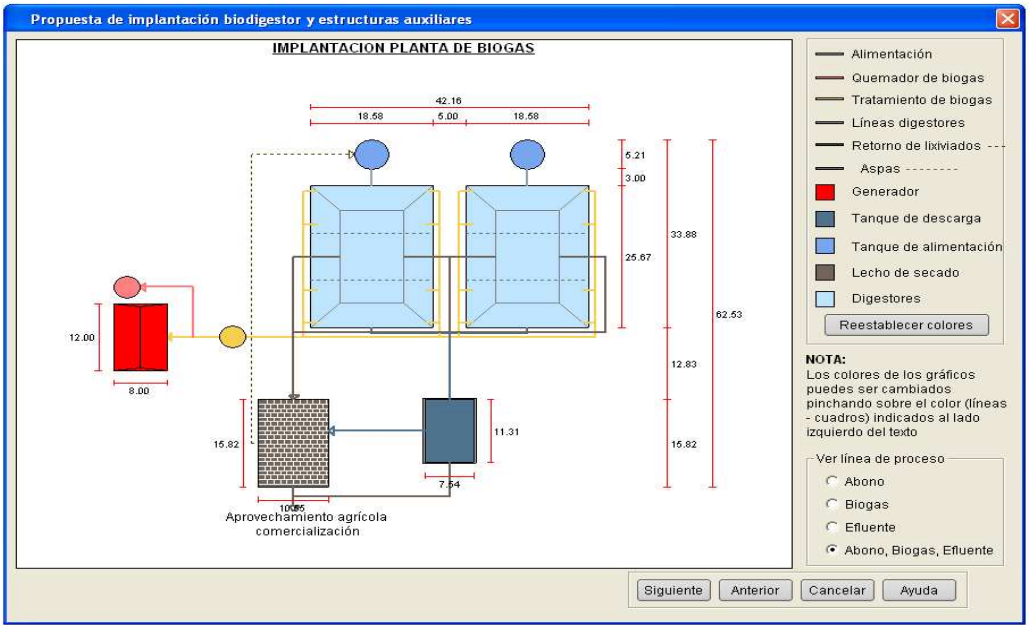



**Figura 4.40. Propuesta de implantación de biodigestores y estructuras auxiliares**

A continuación, en las tablas 4.17 y 4.18, se muestran detalladamente las dimensiones tanto del tanque de alimentación como de los biodigestores y en la tabla 4.19 se mencionan los datos hidráulicos de estos últimos.

**Tabla 4.17: Dimensiones del Tanque de Alimentación**

| FORMA: | CIRCULAR |
|---|---|
| **VOLUMEN:** | 25,59 m³ |
| **LARGO:** | 5,21 m |
| **ANCHO:** | 5,21 m |
| **PROFUNDIDAD:** | 1,20 m |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4.18: Dimensiones del Biodigestores**

| UNIDADES REQUERIDAS: | 2 |
|---|---|
| **TIPO:** | Bajo tierra |
| **MATERIAL:** | Geomembrana |
| **V. TOTAL REQUERIDO:** | 2.714,06 m³ |
| **VOLUMEN DE C/ UNID** | 1.357,03 m³ |
| **LARGO:** | 25,67 m |
| **ANCHO:** | 18,58 m |
| **PROFUNDIDAD:** | 4,50 m |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4. 19: Datos Hidráulicos Biodigestor**

| TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA: | 26 días |
|---|---|
| **CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA:** | 2,91 kg./m3.d |

**Fuente: BioDigestor©**

En la figura 4.41 se puede visualizar la línea del proceso de producción de bioabono para el aprovechamiento agrícola desde el inicio en el biodigestor, pasando por la tubería de descarga, hasta el final de la misma en el lecho de secado, cuyas dimensiones se muestran en la tabla 4.20.

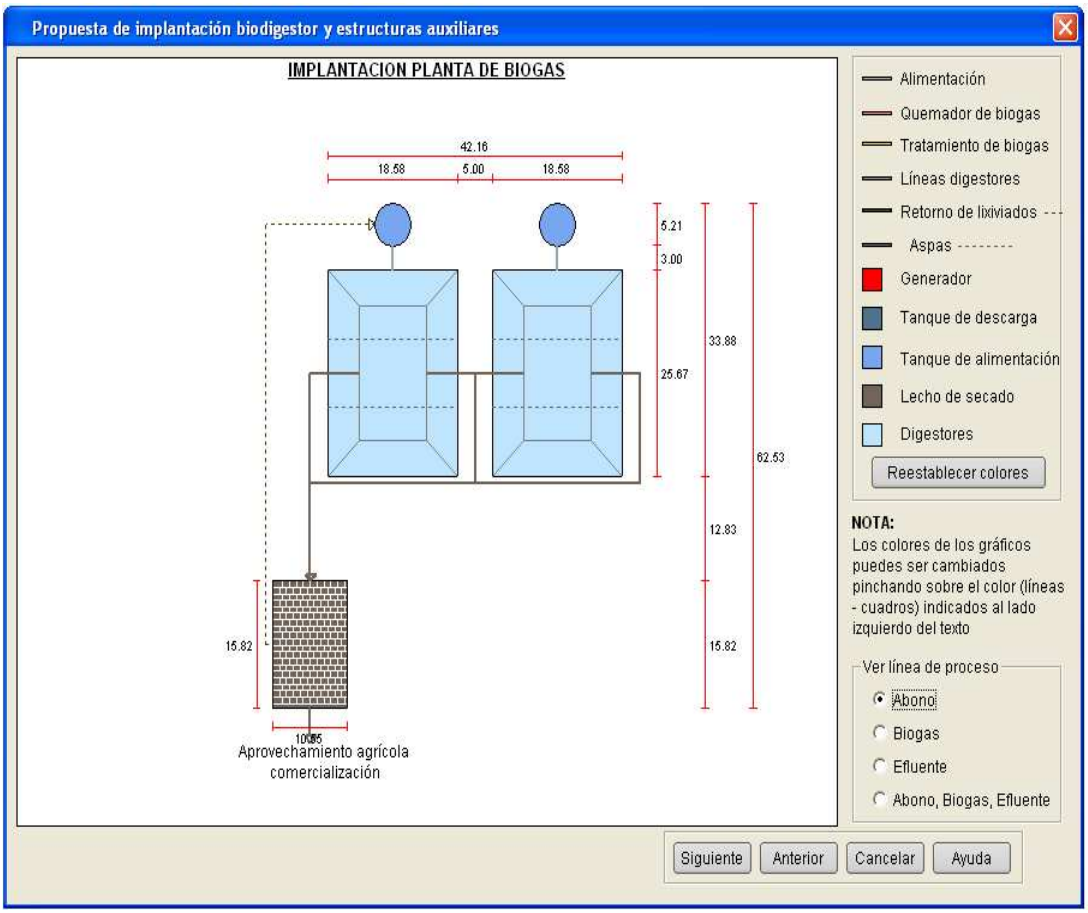



**Figura 4.41. Línea de producción de bioabono**

**Tabla 4.20: Lecho de secado**

| | |
|---|---|
| **ÁREA:** | 166,93 m² |
| **LARGO:** | 15,82 m |
| **ANCHO:** | 10,55 m |

**Fuente: BioDigestor©**

En la figura 4.42 se hace notar la línea del proceso del efluente desde los biodigestores hacia el tanque de descarga, donde es depositado el biol (agua y desechos residuales). Las características físicas asociadas al tanque de descarga se muestran en la tabla 4.21.

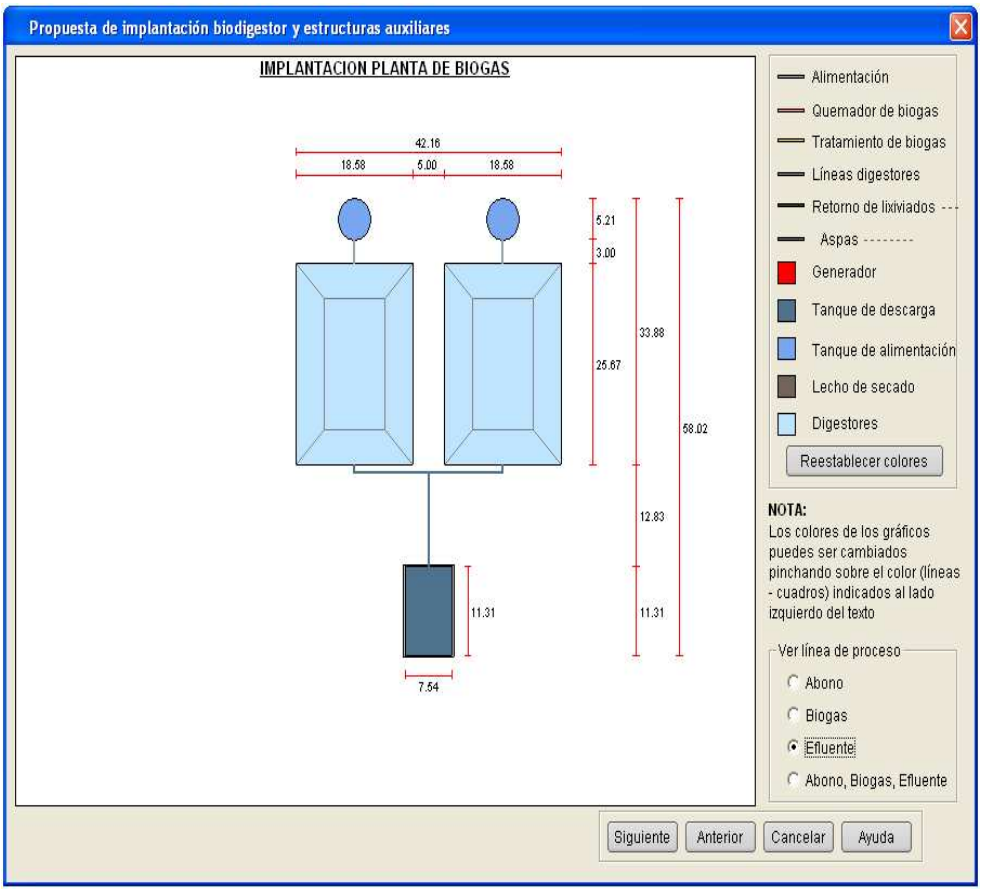



**Figura 4.42. Línea de descarga del biol**

**Tabla 4.21: Tanque de descarga**

| | |
|---|---|
| **VOLUMEN:** | 102,34 m³ |
| **LARGO:** | 11,31 m |
| **ANCHO:** | 7,54 m |
| **PROFUNDIDAD:** | 1,20 m |

**Fuente: BioDigestor©**

En el grafico 4.43 se puede observar la línea del proceso de producción de biogás, iniciándose en el tanque de alimentación, pasando por los biodigestores y las tuberías, hasta llegar al sistema de tratado de biogás, a partir del cual se abastece al generador de energía eléctrica y el excedente es desechado por medio de un quemador.

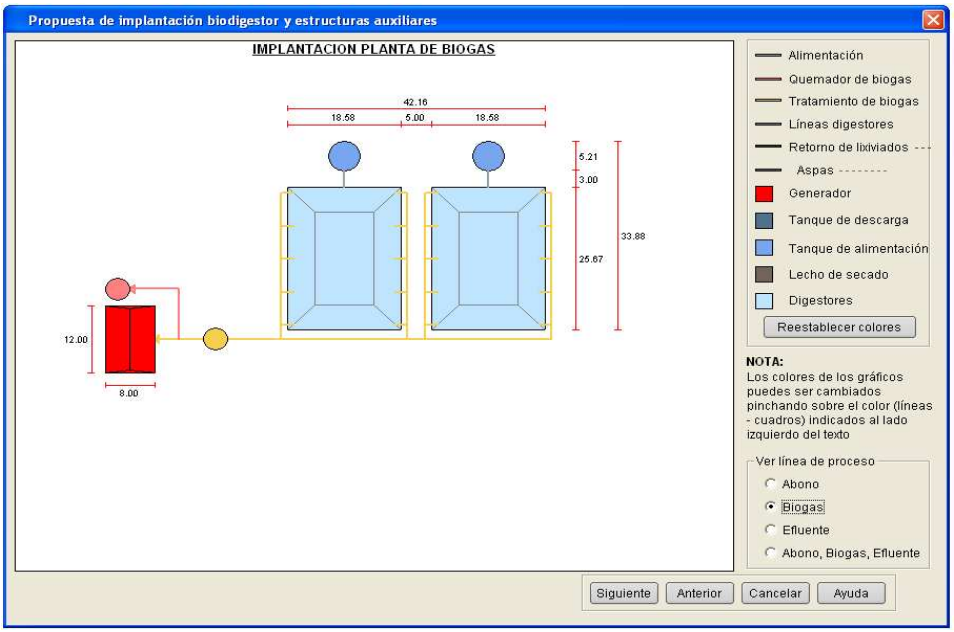



**Figura 4.43. Línea producción de Biogás**.

En las figuras que se muestran a continuación se pueden apreciar diversas vistas muy detalladas del biodigestor, en las cuales se visualiza la disposición de cada uno de los elementos que lo conforman especificando las dimensiones de los mismos dentro del sistema.

En la imagen 4.44 se presenta un corte transversal del tanque de alimentación y el biodigestor, donde se especifican la distancia física que existe entre estos dos elementos, el grosor de las paredes necesario para la construcción de los mismos y la disposición de las tuberías de descarga de biol dentro del biodigestor, etc.

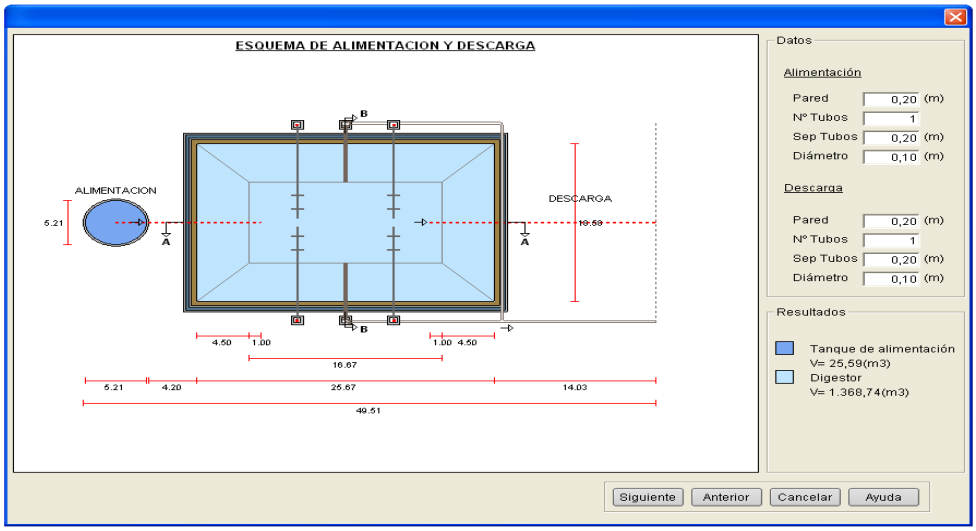



**Figura 4.44. Corte transversal del biodigestor - sistema de alimentación y descarga**

El grafico 4.45 muestra el corte longitudinal A-A del sistema de alimentación y descarga, en el cual se aprecian las alturas referentes al tanque de alimentación, el biodigestor, y el terraplén, así como también la disposición de la tubería de alimentación con biomasa hacia el digestor y la tubería de descarga de biol hasta el tanque de descarga, etc.

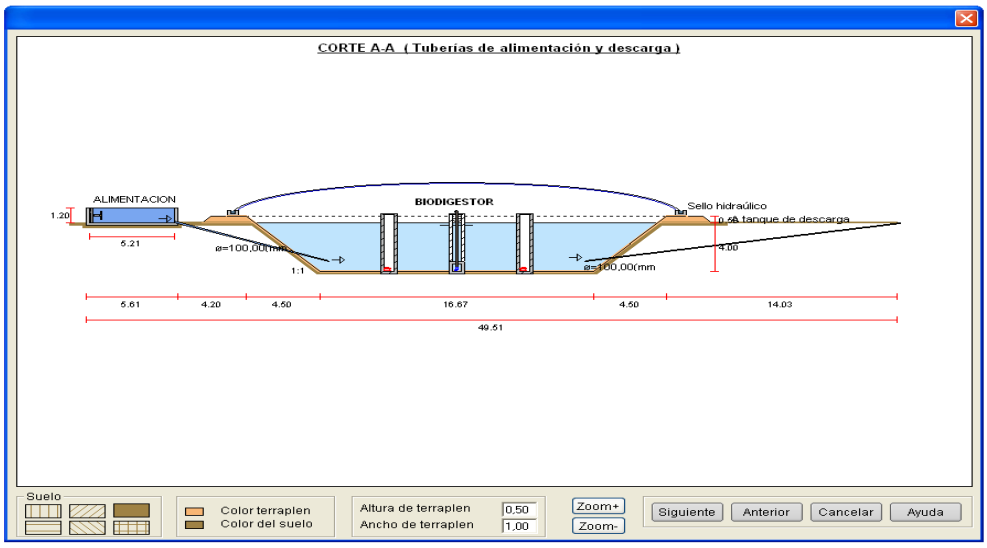



**Figura 4.45. Corte longitudinal del biodigestor - Sistema de alimentación y descarga (A-A)**

La imagen 4.46 presenta el corte longitudinal B-B del biodigestor, en el cual se puede ver la disposición física de los componentes del sistema de agitación, constituido por: Agitadores de biomasa, motores, pozo del agitador, estructuras de soporte.

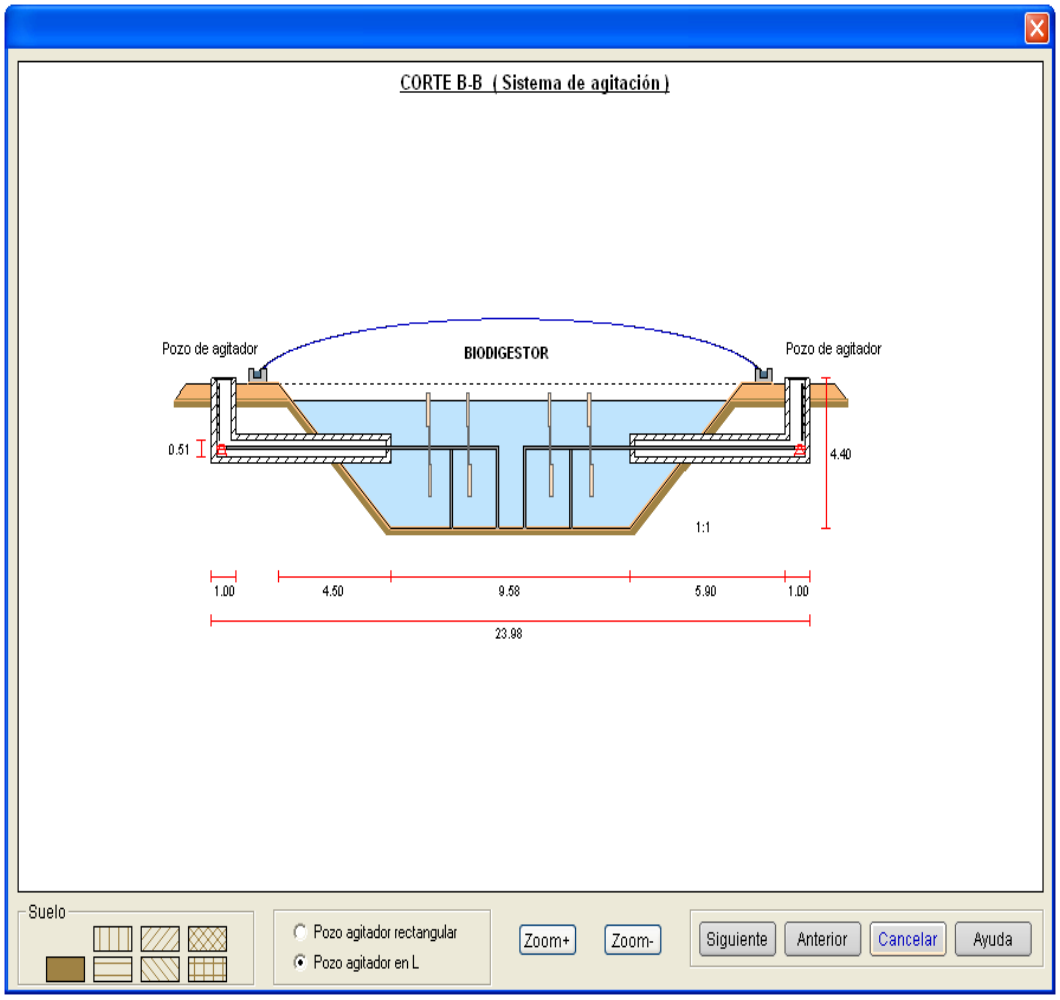



**Figura 4.46. Corte longitudinal del biodigestor - sistema agitación (B-B)**

En la figura 4.47, se observa un corte longitudinal al biodigestor en el que se muestran las dimensiones de las bases que sostienen la cúpula del mismo y también la ubicación física de los elementos que componen el sistema de descarga de lodos, etc.

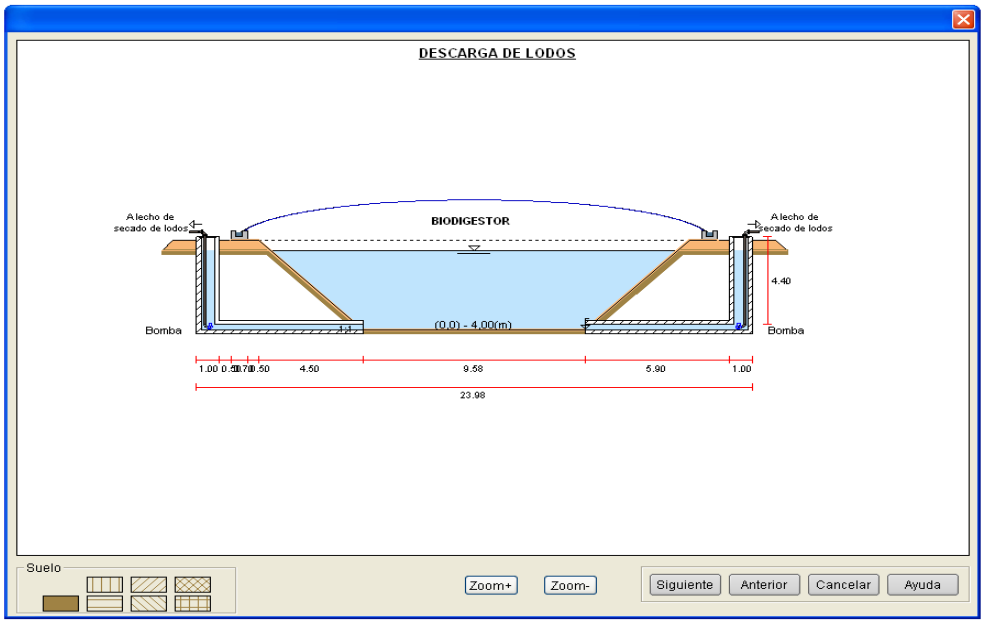



**Figura 4.47. Corte longitudinal del biodigestor - sistema descarga de lodos (B-B)**

En el grafico 4.48 se observa un corte transversal del biodigestor en el que se puede apreciar la ubicación de los distintos puntos de captación de biogás.

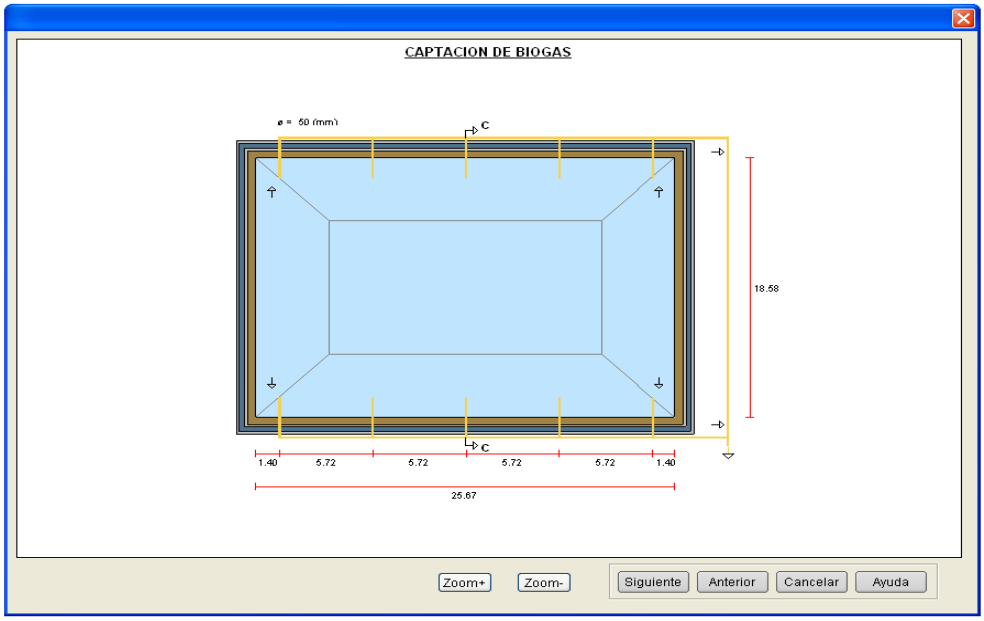



**Figura 4.48. Corte transversal del biodigestor - sistema de captación de biogás**

En la imagen 4.49 se muestra un corte longitudinal del biodigestor en el que se observan las dimensiones de las alturas correspondientes, al biodigestor, el terraplén y las estructuras de soporte de la cúpula del biodigestor. También se especifica el diámetro de las tuberías de biogás.

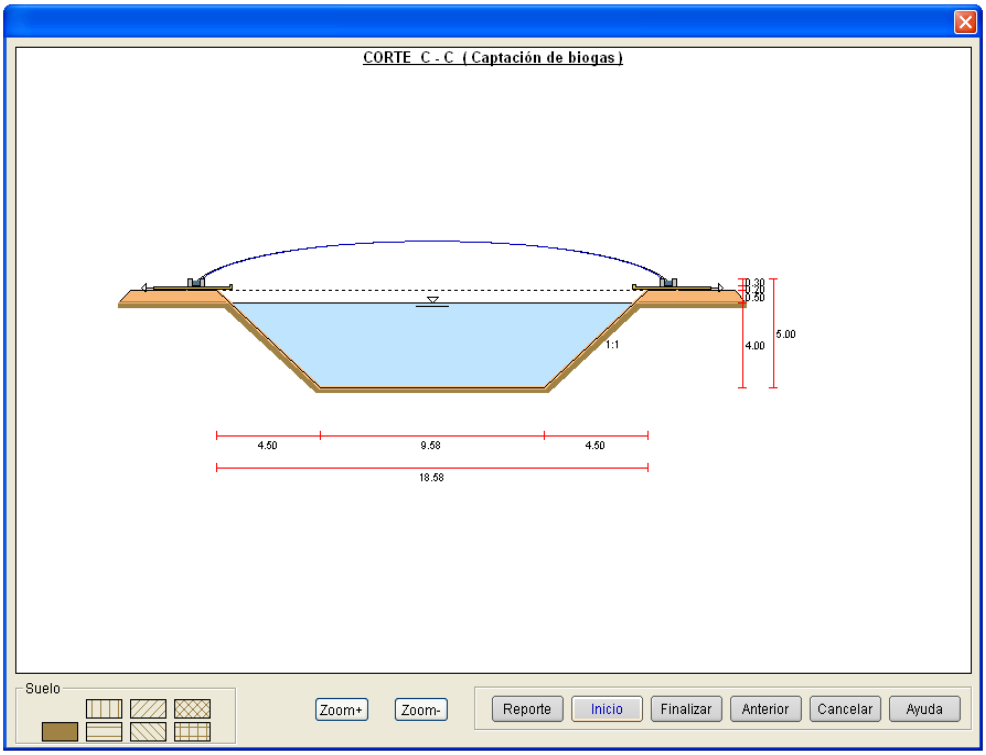



**Figura 4.49. Corte longitudinal del biodigestor - sistema captación de biogás (C-C)**

#### 4.4.4.2. Cálculo de la producción de biogás, energía eléctrica y equivalencias energéticas.

A continuación se presenta un conjunto de tablas en las cuales de energía, equivalencias de dióxido de carbono, producción se indican los resultados obtenidos de los cálculos referentes a la producción específica de biogás y metano, equivalencias energéticas de biogás y producción de fertilizante orgánico arrojados por el software BioDigestor© una vez ingresados los datos del modelo propuesto.

**Tabla 4.22: Producción de biogás y energía**

| PRODUCCIÓN | DIARIO | ANUAL |
|---|---|---|
| **BIOGÁS:** | 2.056,77 m³ | 750.721,05 |
| **METANO:** | 1.234,06 m³ | 450.431,90 m³ |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4.23: Equivalencias CO2**

| | |
|---|---|
| **TONELADAS EQUIVALENTES $CO_2$:** | 6.745,20 t/año |
| **POTENCIA A INSTALAR:** | 152,05 Kw |
| **POTENCIA CALORÍFICA:** | 282,39 Kw |
| **PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD:** | 1.331.996,87 Kw*h/año |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4. 24: Producción específica biogás (Nm3)**

| | |
|---|---|
| **POR m³ DE BIODIGESTOR** | 0,76 m³/día |
| **POR m³ DE BIOMASA** | 28,14 m³/m³ |
| **POR kg. MASA SECA** | 0,20 m³/kg.MS |
| **POR kg. MASA VOLÁTIL** | 0,24 m³/kg.MV |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4. 25: Producción especifica CH4 (Nm3)**

| | |
|---|---|
| **POR m³ DE BIODIGESTOR** | 0,45 m³/día |
| **POR m³ DE BIOMASA** | 16,88 m³/m³ |
| **POR kg. MASA SECA** | 0,12 m³/kg.MS |
| **POR kg. MASA VOLÁTIL** | 0,14 m³/kg.MV |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4.26: Equivalencias energéticas biogás**

| BIOGÁS | DIARIO | ANUAL |
|---|---|---|
| **Nm³** | 2.056,77 | 750.721,05 |
| **BTU** | 43.580.828,90 | 15.907.002.548,50 |
| **MEGA JOULE** | 45.980,21 | 16.782.776,14 |
| **M.CAL** | 10.982,19 | 4.008.501,01 |
| **MW** | 3,65 | 1.332,00 |
| **Hp.H** | 17.157,81 | 6.262.599,43 |
| **BHP** | 1.301,89 | 475.190,52 |
| **TON. TNT** | 11,00 | 4.014,28 |

**Fuente: BioDigestor©**

**Tabla 4. 27: Producción de fertilizante orgánico**

| PRODUCCIÓN | KG/DÍA | T/AÑO |
|---|---|---|
| **LODO SECO** | 6.677,02 | 2.437,11 |
| **BIOL** | 90.521,06 | 33.040,19 |
| **VOL. TOTAL DE FERT. ORGÁNICO** | 97.198,08 | 35.477,30 |

**Fuente: BioDigestor©**

## FASE V DIMENSIONAR Y SELECCIONAR EL GENERADOR DE POTENCIA ELECTRICA.

Actividades:

### 4.5.1. Estimar la producción de biogás.

La producción del biogás para la alimentación del generador será determinada a través de la tabla 4.7. Producción de estiércol - Biogás para diferentes tipos de animales – Basado en el peso del animal. Según esta tabla una vaca de 520 kg de peso, puede producir aproximadamente 43Kg/ d de estiércol e indirectamente 1,07 m³/d de biogás.

Para el modelo de este trabajo de investigación se tomará como peso de referencia 400Kg por animal y un número de bovinos igual a 2000, por lo que la producción del biogás total para la alimentación del generador se determinará a través de la ecuación 33.

$$V_{TBiogas} = N_{A.M} * \frac{P_{A.M} * Prod_{B.T_{4.7}}}{P_{A.T_{4.7}}} \quad (33)$$

$$V_{TBiogas} = 2000 * \frac{500 * 1{,}07}{520} = 2057{,}69 \approx 2056{,}77\, {}^{m^3}/_{d}$$

Donde:

$V_{TBiogas}$ =Volumen total de biogás

$N_{A.M}$ = Número de animales del modelo

$P_{A.M}$ = Peso del animal seleccionado en el modelo

$Prod_{B.T_{4.7}}$ = Producción de biogás en la tabla 4.7

$P_{A.T_{4.7}}$ = Peso del animal de la tabla 4.7

Este valor de $2056{,}77\,{}^{m^3}/_{d}$ representa el volumen de biogás total calculado utilizando la tabla 4.7, que es aproximadamente igual a $2.056{,}77\,{}^{m^3}/_{d}$, valor obtenido utilizando el programa BioDigestor©, ver tabla 4.22, lo cual significa que ambos métodos son completamente factibles a la hora de la determinación del volumen de biogás producido en los biodigestores.

### 4.5.2. Establecer el porcentaje de gas metano contenido en el biogás.

La composición del biogás es muy variada, en general se considera que está constituido principalmente por alrededor de 60% a 70% de metano (CH4) y entre 30% y 40% de dióxido de carbono (CO2) tal como se muestra en la tabla 4.11, esto va a depender principalmente del origen de la biomasa, lo cual puede generar un aumento o una disminución del metano proveniente del biogás como se muestra en la tabla 4.1 y en la tabla 4.3.

En dichas tablas se aprecia que para el ganado vacuno, el porcentaje de gas metano (CH4) contenido en el biogás es del 57%, con lo que se puede determinar el volumen de (CH4) a partir de la ecuación 34.

$$V_{T(CH_4)} = \frac{V_{TBiogas} * 57\%}{100\%} \qquad (34)$$

Un valor más optimista es el utilizado por el programa BioDigestor©, el cual utiliza para la biomasa proveniente de ganado vacuno un porcentaje igual al 60% de (CH4) contenido en el biogás, como se observa en la tabla 4.22.

El volumen de metano estimado por dicho software se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{T(CH_4)BIODIGESTOR} = \frac{V_{TBiogas} * 60\%}{100\%} \quad (35)$$

### 4.5.3. Establecer la cantidad de gas metano producido por día.

Una vez determinado el porcentaje de metano contenido en el biogás, se puede determinar el volumen de CH4, producido diariamente a partir de la ecuación 34 o la ecuación 35, según sea el caso.

$$V_{T(CH_4)} = \frac{2057{,}69 * 57\%}{100\%} = 1172{,}82 \ {}^{m^3}/_{d}$$

$$V_{T(CH_4)BIODIGESTOR} = \frac{2056{,}77 * 60\%}{100\%} = 1234{,}06 \ {}^{m^3}/_{d}$$

De los cálculos se desprende, que si bien los porcentajes de metano utilizados por la tabla 4.2 y el programa BioDigestor© son diferentes, el valor de gas metano obtenido es muy parecido.

$$V_{T(CH_4)} \approx V_{T(CH_4)BIODIGESTOR}$$

$$1172{,}82 \ {}^{m^3}/_{d} \approx 1234{,}06 \ {}^{m^3}/_{d}$$

### 4.5.4. Determinar la eficiencia de producción de energía eléctrica del sistema motor-generador.

A continuación se procederá a determinar la eficiencia del par motor-generador, a sabiendas que la eficiencia en los motores de gasolina y gas tienen una eficiencia relativamente baja, en el orden de 30% a 35% y que los motores diesel tienen una eficiencia un poco mayor, en el rango de 38% a 45%.

En los generadores la eficiencia suele ser mayor en comparación con los motores, y está comprendida generalmente entre valores que van desde el 96% hasta el 98%. Para el desarrollo de la presente investigación se tomaran valores de rendimiento promedio, tanto para el generador como para el motor, en este caso 97% y 34% respectivamente.

Aplicando la ecuación 29 podemos determinar la eficiencia par motor generador.

$$\mathcal{E}_{\text{Par M.G}} = \mathcal{E}_{\text{Motor}} * \mathcal{E}_{\text{Gener}} \quad (29)$$

$$\mathcal{E}_{\text{Par M.G}} = 0{,}34 * 0{,}97 = 0{,}33$$

### 4.5.5. Cálculo de la potencia del sistema motor-generador a instalar.

Después de haber estimado apropiadamente el volumen de metano (CH4) contenido en el biogás y la eficiencia eléctrica del sistema motor-generador, el siguiente paso es determinar la potencia en KW que será necesaria para el dimensionamiento del generador de biogás, por lo cual es preciso calcular previamente la producción diaria de energía eléctrica a través de la ecuación numero 16.

Posteriormente se estimara la potencia del sistema como el cociente de la energía producida diariamente, entre el número de horas que funcionara la planta cada día, ver ecuación numero 31.

$$E = CH_4\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{d}}\right) * K_e\left(\frac{\mathrm{kW} * \mathrm{h}}{\mathrm{m}^3}\right) * \mathcal{E}_{Par\ M.G} \tag{30}$$

$$E = 1172{,}82\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{d}}\right) * 10\left(\frac{\mathrm{kW}*\mathrm{h}}{\mathrm{m}^3}\right) * 0{,}33 = 3870{,}30\ \frac{(\mathrm{kw}*\mathrm{h})}{\mathrm{d}}$$

$$\mathrm{P} = 3870{,}30\ \frac{(\mathrm{kw} * \mathrm{h})}{\mathrm{d}} * \frac{1\mathrm{d}}{24\ \mathrm{h}} = 161{,}26\ \mathrm{kW} \tag{31}$$

Donde:

$E =$ Cantidad de Energía producida

$CH_4$= Gas metano producido diariamente

$K_e$ = Factor de Equivalencia (Ver tabla 4.13)

$\mathcal{E}_{Par\ M.G}$ = Eficiencia del Par Motor-Generador

P = Potencia del motor-generador

En la figura 4. 20, se puede apreciar que el valor sugerido por el programa BioDigestor© es 152,05 Kw, si bien el software utiliza para la determinación de éste un factor de equivalencia igual a nueve y un parámetro de eficiencia del par motor-generador de 35%, el resultado es aproximadamente igual al que acabamos de conseguir mediante el uso los datos de la tabla 4.13 y el empleo de la ecuaciones 11 y 12.

Para que el sistema motor-generador sea aun más confiable, al diseño del mismo se le aplicara un factor de seguridad igual a 15%, como se puede notar en la ecuación numero 32.

$$P_{total} = P * 1{,}15 \quad (32)$$

$$P_{total(kw)} = 161{,}26\,kW * 1{,}15 = 185.45kW$$

Este valor de potencia se puede comparar con el obtenido por el software BioDigestor©, ver figura 4.20, y se puede constatar que la diferencia entre ambas potencia es menor al 2%, lo que indica que ambos métodos son perfectamente viables para la determinación de la potencia generada por el biogás de la planta.

La potencia eléctrica para selección de motores por lo general se acostumbra a expresarla en KVA, por lo que a continuación se procederá a la transformación de la misma asumiendo un factor de potencia igual a 0,8 y aplicando la ecuación 109

$$P_{total(kVA)} = \frac{185.45kW}{0{,}8} = 231{,}8\,kVA \quad (33)$$

En conclusión, las especificaciones eléctricas adecuadas para la selección del motor-generador de la planta de biogás en función a los datos obtenido por el software BioDigestor© y corroborados por las tablas presentes en este proyecto de investigación, tienen que ser las siguientes, ver Tabla 4.28.

**Tabla 4. 28: Características eléctricas del motorgenerador**

| | |
|---|---|
| **CAPACIDAD EN KVA** | 231,8 |
| **CAPACIDAD EN KW** | 185.45 |
| **TENSIÓN DE TRABAJO** | 480 V |
| **FP** | 0,8 |
| **FRECUENCIA DE TRABAJO** | 60 Hz |
| **VELOCIDAD** | 1800 rpm |
| **TIPO DE COMBUSTIBLE** | Biogás |

**Fuente: Elaboración Propia**

### 4.5.6. Selección del sistema motogenerador a instalar

El grupo electrógeno a gas seleccionado es el CAT- G3406 que funciona 60 Hz/1800rpm y una tensión de 480 V, proporcionando una potencia continua de 190 Kwe a un factor de potencia de 0.8, cumpliendo las especificaciones de la tabla 4.28. Para observar con mayor detalles las características eléctricas del mismo ver anexos.

Este motogenerador posee la virtud de trabajar tanto con gas natural, así como también con gases con alto contenido de Metano (Biogás), proporcionado una alta densidad de potencia y manteniendo una excelente eficiencia del combustible por medio de un modulo de control del gas, que regula automáticamente y con precisión la ignición, controla el motor y la relación aire combustible para la optima economía del combustible, a la vez que mantiene un estricto control de las emisiones de $NO_x$ bajo distintas condiciones ambientales y situaciones de carga; también cuenta con sensores de detonación individuales en cada cilindro y con control de reglaje, además de poseer un sistema optimo de refrigeración por medio de una chaqueta de agua y un sistema de radiador. Ver anexos 13 y 14. Asimismo, el CAT- G3406 cuenta con un alto índice de recuperación del calor a través de una integración hidráulica personalizada de intercambiadores térmicos, lo cual permite satisfacer las necesidades específicas para cada cliente.

El motor CAT- G3406 y su concepto consisten en un motor a gas montado en un chasis base, así como un grupo turbocompresor aislado de vibraciones, que da como resultado una menor propagación de vibraciones del motor hacia otros equipos. Este grupo incluye turbocompresores, intercambiadores térmicos con conductos y válvulas de control, sistemas de alimentación de gas, válvula de dosificación de gas y mezclador de gases, panel de interfaz, e interfaces hidráulicos estandarizados para el cliente.

**FASE VI SIMULAR UTILIZANDO MATLAB®-SIMULINK, EL SISTEMA MOTOR GENERADOR CON CARACTERISTICAS SIMILARES AL SELECCIONADO EN LA FASE V, A FIN DE CARACTERIZAR SU COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO.**

### 4.6.1. Construcción del modelo matemático del Motor de Ciclo Otto.

En el modelamiento termodinámico de un motor del ciclo Otto, es necesario establecer características iniciales tales como: Cp, Cv, PCI; las cuales son dependientes del tipo de combustible. Además, otras singularidades propias del motor como lo son: ω, V, P, T, ρ, AFR.

A continuación, se introduce el significado de las, abreviaturas antes mencionadas:

$C_p$: $Capacidad\ calorífica\ a\ presión\ constante$ $J/g.K$

$C_v$: $Capacidad\ calorífica\ a\ volumen\ constante$ $J/g.K$

$PCI_{CH4}$: $Poder\ Calorífico\ Inferior\ del\ metano$ $Kcal/m^3$

$\omega$ : Velocidad del motor en RPM

$V$ : Volumen maximo del cilindro L

$P$: Presion inicial de la mezcla aire − combustible Atm

$T$ : Temperatura inicial de la mezcla aire − combustible °K

$\rho$ : $Relacion\ de\ compresion$

AFR : Relacion aire − combustible

La creación del modelo matemático, del motor de Ciclo Otto, consistió en la construcción de 6 bloques principales en el programa matlab® simulink, los mismos se denominan de la siguiente manera: Componentes de Mezcla, Temperatura

de Pos-compresión, Aporte Calorífico, Trabajo de Compresión, Trabajo de Expansión y Calculo de Potencia; respectivamente.

A continuación, se describe el proceso matemático que se concluye en el diagrama de bloque de matlab® simulink, mencionados con anterioridad.

#### 4.6.1.1. Componentes de la mezcla

Se denomina componente de mezcla; a la cantidad de masa de aire y masa de combustible que va a contener; la composición que alimentaran, un cilindro del motor de combustión interna; para el cálculo de dicha variable, se tendrán como datos de entrada, los siguientes valores conocidos: $P_1$, $V_1$, ω, $T_1$, $R$.

Para dar inicio al modelado matemático del bloque, se introduce la Ley de los Gases Ideales, como se presenta en la ecuación numero 36.

$$P_1.V_{1(\omega)} = n.R.T_1 \tag{36}$$

De la expresión anterior, obtenemos la ecuación numero 37; que representa la manera de calcular, el numero de moles del sistema.

$$n = \frac{P_1.V_{1(\omega)}}{R.T_1} \tag{37}$$

De la ecuación 37, se tiene como incógnita; el volumen de la mezcla en el cilindro del motor de combustión $V_{1(\omega)}$, ya que este parámetro depende de la velocidad del motor.

Los valores de volumen $V_{(\omega)}$ en función de la velocidad, se sustentan en los estudios realizados por MIGUEL ÁNGEL PÉREZ BELLÓ, en su trabajo Tecnología de los motores, el cual se puede apreciar en la figura 4.50.

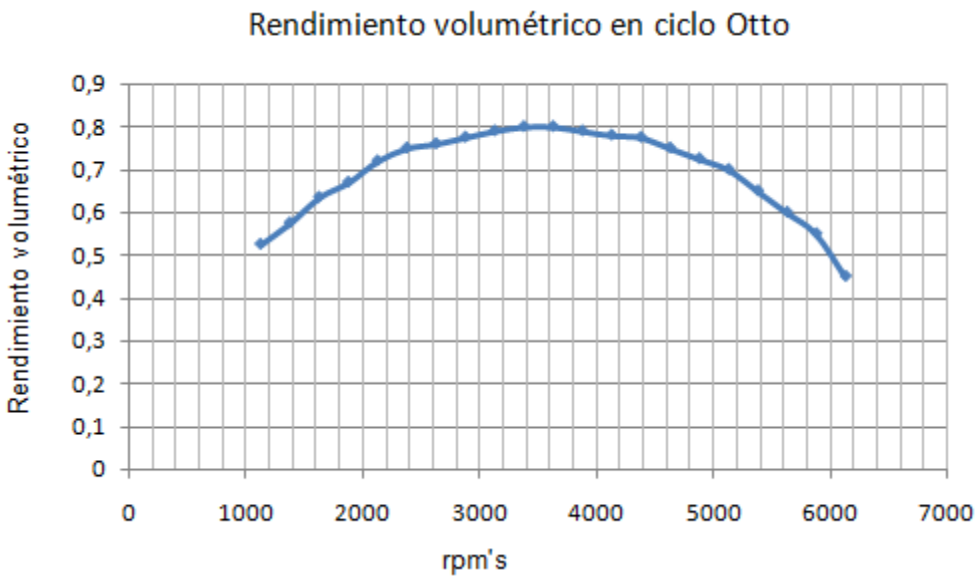



**Figura: 4.50 Rendimiento volumétrico en el ciclo Otto**

En la figura 4.50, se presenta una curva de rendimiento volumétrico en el Ciclo Otto, se introducen en la curva con los valores nominales de rpm del motor y se obtiene el rendimiento volumétrico ($\eta_\omega$), con este parámetro y la ecuación número 38, se encuentra el valor del volumen $V_{1(\omega)}$, como se muestra a continuación:

$$V_{1(\omega)} = V_1 . \eta_\omega \tag{38}$$

Sustituyendo la expresión (38) en la ecuación (36) y se obtiene el número de moles (n), como se muestra a continuación:

$$n = \frac{P_1 . V_1 . \eta_\omega}{R . T_1} \tag{39}$$

Una vez obtenido el número de moles, se procede a determinar la masa del aire que compone la mezcla dentro del cilindro, tal como se representa en la ecuación numero 40.

$$m_{aire}[g] = n_{moles}[mol] * m_{molar\ del\ aire}\left[\frac{g}{mol}\right] \tag{40}$$

A partir de este valor de masa de aire, se determina la masa del combustible de la siguiente manera:

$$m_{comb}[g] = \frac{m_{aire[g]}}{AFR} \tag{41}$$

La figura 4.51 muestra la estructura interna del bloque denominado; "Componentes de la mezcla", en el cual se representan, las ecuaciones matemáticas plasmadas en el lenguaje matlab® simulink; en este bloque se tiene como variables principales de salida la masa de aire y la masa del combustible.

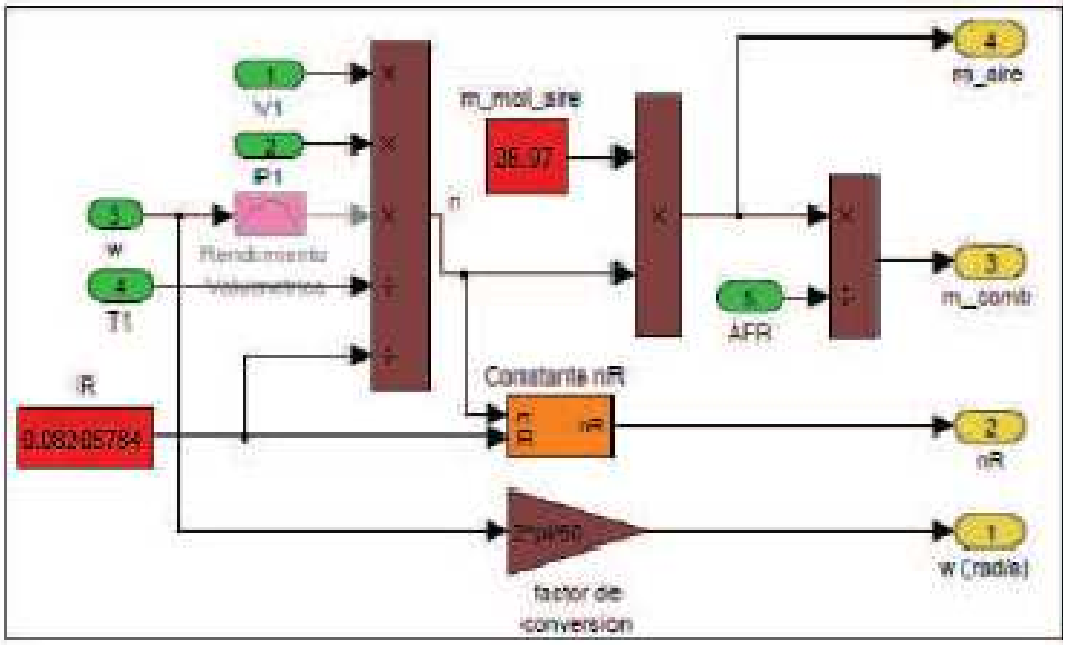



**Figura: 4.51 Bloque de componentes de la mezcla aire-metano**

Dentro del bloque; "Componentes de la Mezcla", también se puede encontrar sub-bloques como: el sub-bloque denominado "Constante nR" (ver figura 4.51); donde se determina el producto de los números de moles $n$ por la constante universal de los gases R ($0.082\ \left[{}^{Atm.L}/_{\circ K.Mol}\right]$), refiérase a la figura 4.52. Esto con la idea de hacer el programa más eficiente, con el aprovechamiento de este valor en cálculos posteriores.

$$Constante_{nR} = n.R \tag{42}$$

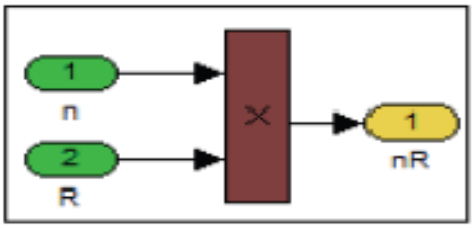



**Figura: 4.52 Bloque constante nR**

En este mismo orden de idea, se establece un segundo sub-bloque, el cual se encarga de hacer la conversión de la velocidad del motor de combustión interna $\omega$, de rpm a radianes sobre segundo, ver figura 4.51.

$$\omega_{(rad/s)} = \omega(2\Pi/60) \tag{43}$$

#### 4.6.1.2. Temperatura de post compresión

La finalidad principal de este bloque, fue la determinación de la temperatura de la mezcla, una vez finalizado el proceso de compresión del Ciclo Otto. Para el cálculo de dicha temperatura $T_2$ , se partió de la Ley de Charles Gay-Lussac, como se muestra en la ecuación número 44:

$$T_2 = T_1 . (\frac{V_1}{V_2})^{k-1} \tag{44}$$

Donde k es una constante de evolución politrópica y se define como **k**= $\frac{Cp}{Cv}$ y $\rho$ es la relación de compresión del motor de combustión interna y se define $\rho = \frac{V_1}{V_2}$, por lo que la ecuación (44) se puede escribir de la siguiente manera:

$$T_2 = T_1 . (\rho)^{k-1} \tag{45}$$

La figura 4.53 muestra la estructura interna del bloque "Temperatura Post-compresión" utilizando el lenguaje matlab® simulink, basado en la ecuación numero 45.

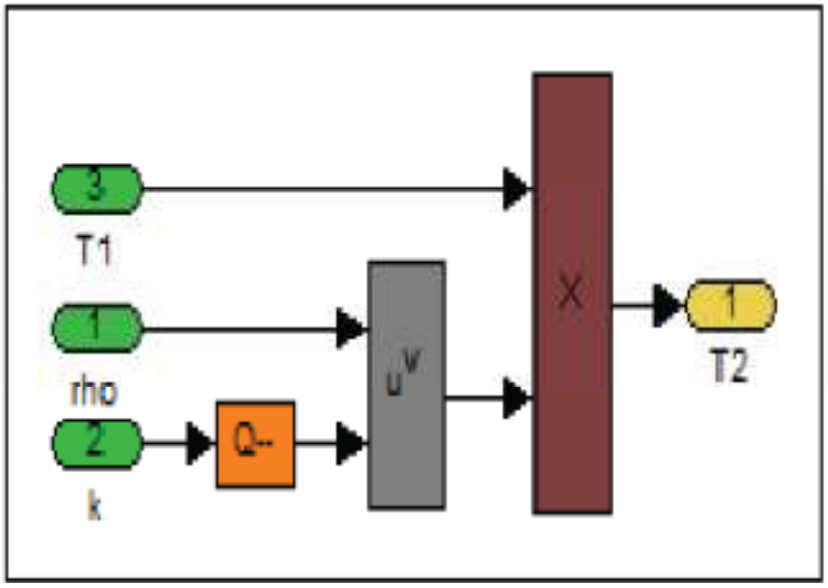



**Figura: 4.53 Bloque de Temperatura Post-compresión**

#### 4.6.1.3. Aporte calorífico

Teniendo como variables de entrada: la velocidad (ω), la masa del combustible ($m_{comb}$); calculado con anticipación y poder calorífico inferior del gas $PCI_{gas}$, este ultimo dependió del combustible, y es un valor conocido. En la ecuación número 46, solo se desconoce la variable rendimiento del combustible ($\eta_{combustible}$); como se muestra a continuación. Y su valor se obtiene a partir de la gráfica de la figura 4.54.

$$Q = m_{comb}.PCI_{gas}.\eta_{combustible} \quad (46)$$

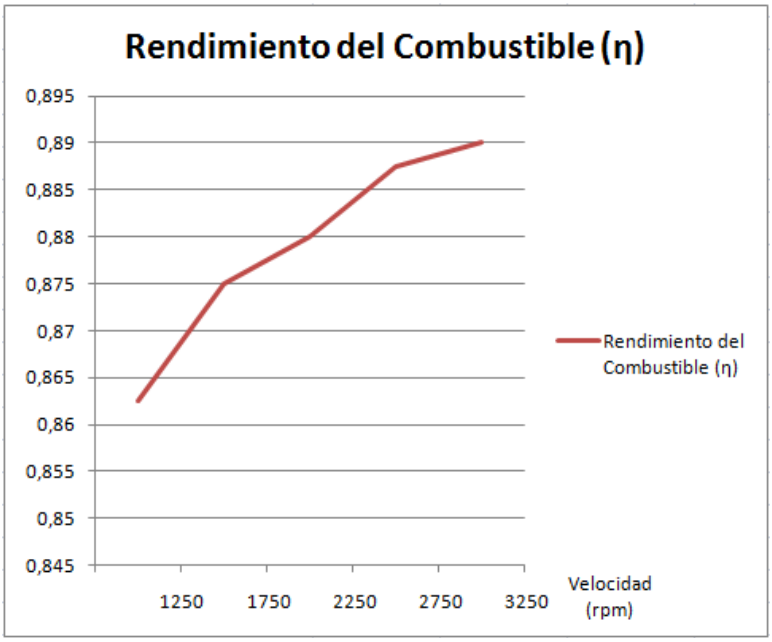



**Figura: 4.54 Grafica rendimiento del combustible Vs velocidad**

Una vez calculado el aporte calorífico, se obtiene el valor de ΔT; como se muestra a continuación:

$$\Delta T = \frac{Q}{(m_{aire} + m_{comb}).Cv} \quad (47)$$

En la figura 4.55; se muestra la estructura interna del bloque "Aporte calorífico", representado en los diagramas del programa, matlab® simulink; donde se obtiene como variable de salida, la variación de temperatura (ΔT), que ocurre durante el proceso de combustión.

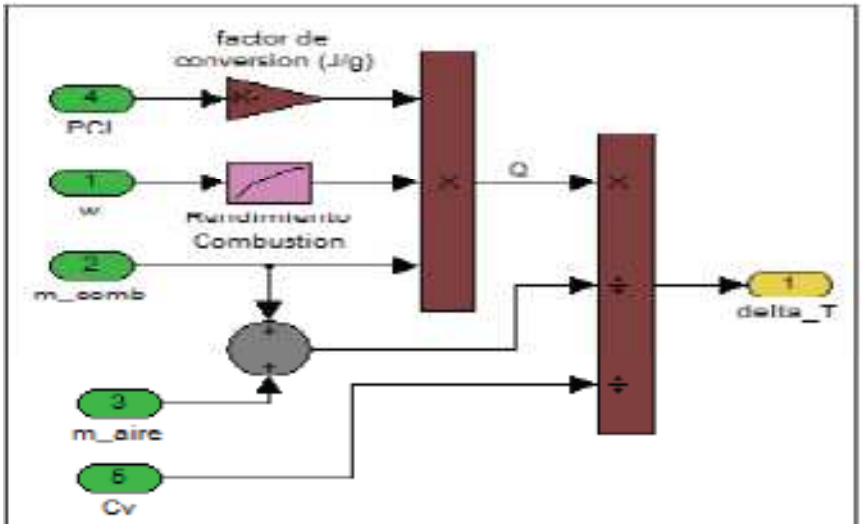



**Figura: 4.55 Bloque de Aporte Calorífico**

Conocida la temperatura, al final de la compresión ( $T_2$), y la variación de temperatura que ocurrió en el proceso de combustión (ΔT), se obtiene la temperatura al inicio de la expansión ( $T_3$), tal como se muestra a continuación:

$$T_3 = T_2 + \Delta T \quad (48)$$

La figura 4.56, muestra el cálculo de la temperatura $T_3$, en el diagrama de bloques suministrado por el programa matlab® simulink.

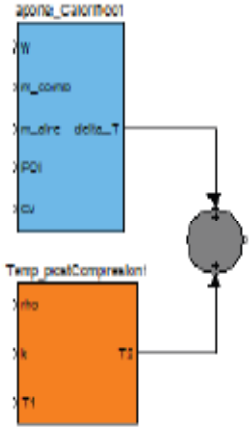



**Figura: 4.56 Calculo de la temperatura $T_3$**

#### 4.6.1.4. Trabajo de compresión

El modelado matemático, del trabajo producido en el proceso de compresión del ciclo Otto del motor de combustión interna, partimos de la siguiente ecuación de trabajo:

$$W_c = \frac{nR}{1-k}(T_2 - T_1) \tag{49}$$

Se hicieron transformaciones sucesivas de la ecuación 49, en función de hacer la representación menso compleja, de la misma en matlab® simulink. Tal como se muestra a continuación:

Partiendo de la ley de los gases ideales, en el inicio de la compresión; es decir en el punto 2 del ciclo Otto, surge la ecuación 50:

$$P_2.V_{(2)} = n.R.T_2 \tag{50}$$

Despejando la temperatura $T_2$ , de la ecuación 50 se obtiene:

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{n.R} \tag{51}$$

Con la expresión anterior, se introduce una incógnita al sistema, en este caso es la presión en el punto 2 del ciclo Otto (al inicio de la compresión).

Considerando las propiedades adiabáticas del proceso de compresión del ciclo Otto, es decir en los límites del punto uno y dos; de la curva P-V; refiérase a la figura 2.16 del capítulo 2, del presente trabajo de investigación. Se tiene:

$$P_2 = P_1.(\frac{V_1}{V_2})^k \tag{52}$$

Sustituyendo la ecuación (52) en la ecuación (51), se obtiene una expresión como la que se muestra en la ecuación 53:

$$T_2 = \frac{P_1 V_2}{n.R} . (\frac{V_1}{V_2})^k \quad (53)$$

Partiendo de la Ley de los Gases Ideales, se establece el camino a seguir para, obtener el valor de la presión en el punto uno de la curva Presión-Volumen de la curva termodinámica, como se indica a continuación:

$$P_1 . V_1 = n.R.T_1 \quad (54)$$

Despejando $P_1$ de la ecuación 54, e introduciendo este valor en la ecuación 53, resulta:

$$T_2 = T_1 . (\frac{V_2}{V_1}) . (\frac{V_1}{V_2})^k \quad (55)$$

Considerando que la relación de compresión $\rho = (\frac{V_1}{V_2})$, sustituyendo esta expresión en la ecuación 54, se obtiene:

$$T_2 = T_1 . \rho^{(k-1)} \quad (56)$$

Finalmente se sustituye, el valor de $T_2$, en la ecuación principal se obtiene la nueva expresión, para el cálculo del trabajo de compresión. Tal como se muestra a continuación:

$$W_c = \frac{n.R.T_1}{1-k} . \left( \rho^{(k-1)} - 1 \right) \quad (57)$$

La figura 4.57 muestra la representación en matlab® simulink, de la expresión trabajo de compresión, ecuación número 57.

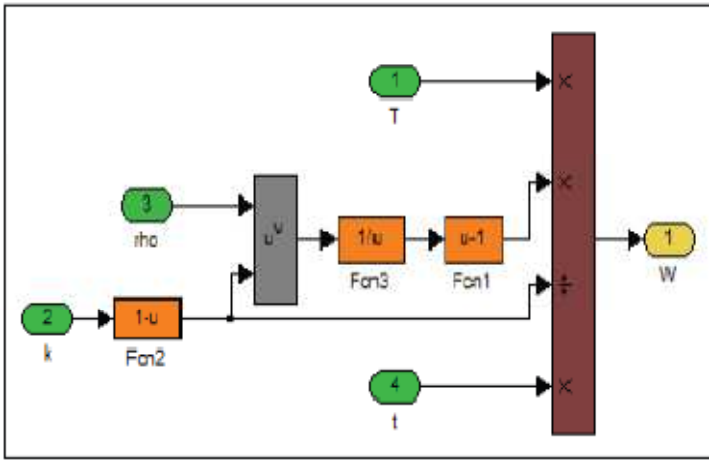



**Figura 4.57 Bloque Trabajo Compresión**

#### 4.6.1.5. Trabajo de expansión

Para hacer el cálculo, del trabajo de expansión, en un motor de Ciclo Otto; se partió de la siguiente expresión:

$$W_e = \frac{nR}{1 - k_e}(T_4 - T_3) \tag{58}$$

De la expresión 58, se desconoce el valor de la temperatura $T_4$. Para ello se toma en consideración la aplicación de la Ley de los Gases Ideales, en el punto 4 de la curva Presión-Volumen del ciclo termodinámico, en consecuencia se tiene la siguiente expresión:

$$P_4.V_4 = n.R.T_4 \tag{59}$$

Despejando $T_4$, de la expresión anterior se tiene:

$$T_4 = \frac{P_4.V_4}{n.R} \tag{60}$$

Se introduce una nueva incógnita al sistema, ya que la presión $P_4$, de la ecuación número 60 es desconocida. Aplicando la Ley de Boyle durante el proceso de

expansión, es decir entre los puntos 3 y 4. Además, se tomó en consideración las características adiabáticas del proceso, se obtuvo:

$$P_4 = P_3.\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k_e} \tag{61}$$

Teniendo como incógnita la presión al inicio de la expansión $P_3$, en la ecuación (61). Se aplica la ley de los gases ideales en el punto 3.

$$P_3.V_3 = n.R.T_3 \tag{62}$$

Despejando $P_3$ de la ecuación (62), he introduciendo este valor en la ecuación (61), se obtuvo la siguiente expresión:

$$P_4 = \frac{nRT_3}{V_3}.(\frac{V_3}{V_4})^{k_e} \tag{63}$$

Recordando que los procesos de combustión y de escape del ciclo Otto de un motor de combustión son isocoros, es decir ocurren a volumen constante, se deduce que: $V_3 = V_2$ y $V_4 = V_1$, entonces la ecuación (63) se escribió de la siguiente manera:

$$P_4 = \frac{nRT_3}{V_2}.(\frac{V_2}{V_1})^{k_e} \tag{64}$$

Considerando que $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\rho}$, resulta:

$$P_4 = \frac{nRT_3}{V_2}.(\frac{1}{\rho})^{k_e} \tag{65}$$

Sustituyendo la ecuación (65) en la ecuación (60), se tiene como resultado la expresión, para el cálculo de la temperatura en el punto 4.

$$T_4 = T_3.\rho^{(1-k_e)} \tag{66}$$

Sustituyendo este valor de temperatura $T_4$, se obtiene la expresión para el cálculo del trabajo en el proceso de expansión, de la siguiente manera:

$$W_e = \frac{n.R.T_3}{1-k_e}.\left(\rho^{(1-k_e)} - 1\right) \tag{67}$$

La figura 4.58 muestra el bloque denominado; "Trabajo de expansión", en el cual se puede verificar la representación en matlab® simulink, del modelo matemático para el cálculo del trabajo de expansión $W_e$, expresado en la ecuación 67.

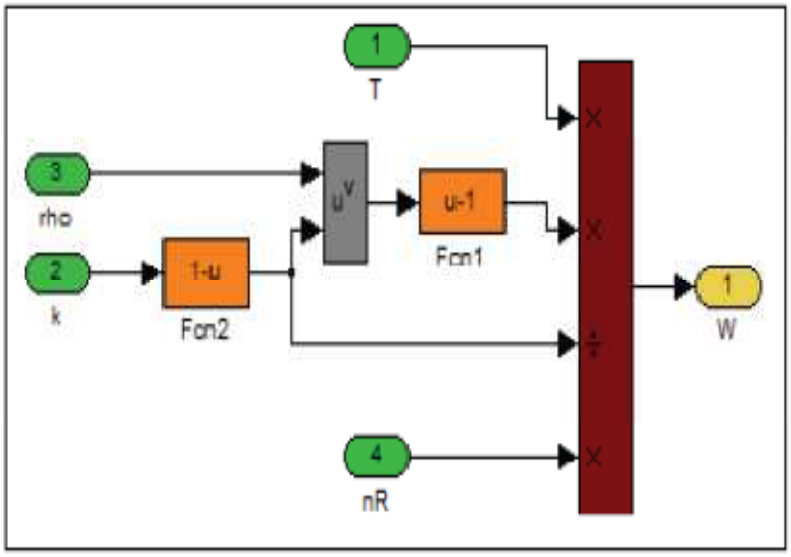



**Figura 4.58 Bloque Trabajo Expansión**

#### 4.6.1.6. Calculo de potencia

Una vez determinados los trabajos de compresión y expansión, se calcula el trabajo total del motor de combustión interna; a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{T_{[atm.l]}} = W_c + W_e \tag{68}$$

Seguidamente, se transforma las unidades de este valor de trabajo, a la unidad del sistema internacional, como es el caso de la energía según el sistema m.k.s es el Joule, tal como se muestra a continuación:

$$W_{[J]} = W_T[atm.l] * \frac{101{,}32\ (J)}{[1\ atm.l]} \tag{69}$$

Después de haber determinado el trabajo total $W_{[J]}$, que genera el motor de combustión interna, se determina la potencia eléctrica del mismo; como el producto entre el trabajo total, el número de cilindros del motor y la velocidad.

$$P(^{J}/_{S}) = W_T(J) * \#Cilindros * \omega_{(^{rad}/_{S})} \tag{70}$$

Considerando que $(^{J}/_{S}) = W$, y además; que un caballo de fuerza (Hp) equivale 746W, se obtiene la potencia mecánica del motor de combustión interna de la siguiente manera:

$$P_{Mecanica\ (Hp)} = P_{Electrica\ (W)} \cdot \frac{1\ Hp}{746\ W} \tag{71}$$

La figura 4.59 muestra cada una de las ecuaciones matemáticas utilizadas para calcular la potencia mecánica del motor de combustión interna, representadas en un diagrama del programa matlab® simulink.

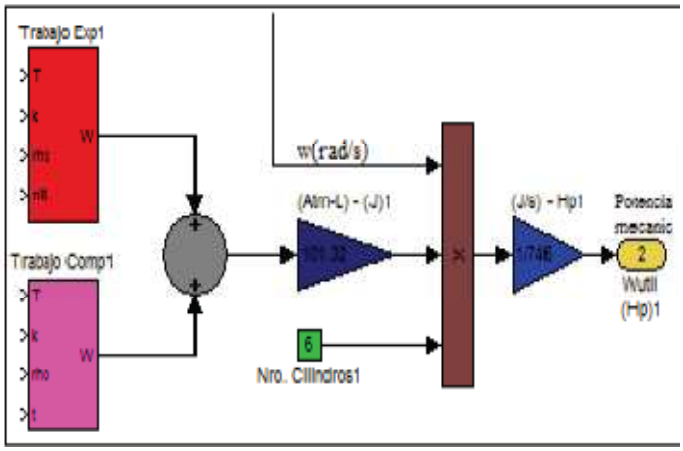



**Figura 4.59 Calculo de potencia mecánica**

La figura 4.60 muestra toda la estructura de modelación del motor de Combustión interna Ciclo Otto, en diagramas del programa matlab® simulink.

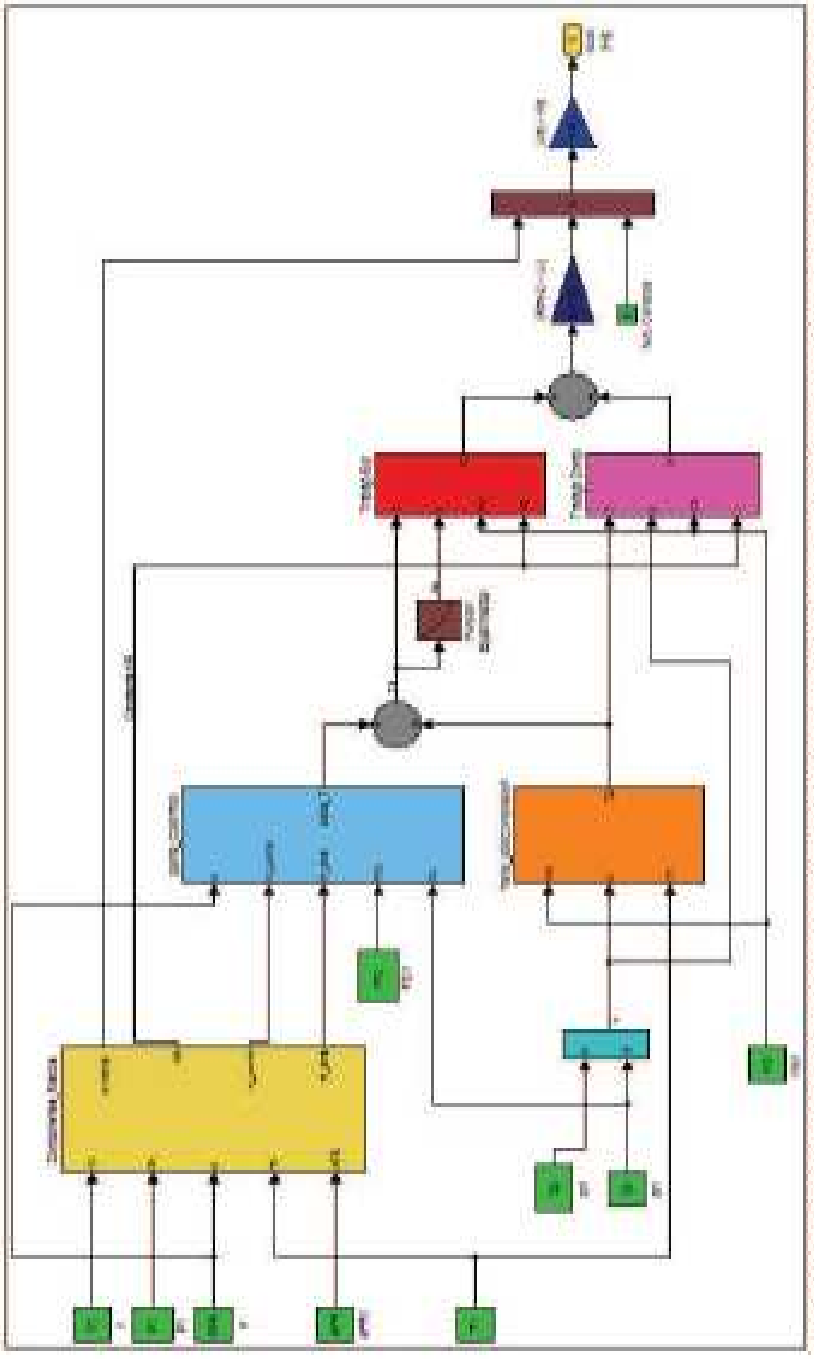


**Figura 4.60: Diagrama de bloques del motor de combustion interna**

### 4.6.2. Modelo de la maquina sincrónica funcionando como generador en el lenguaje matlab® simulink.

El modelo de la máquina síncrona implementado en este trabajo de investigación, será el propuesto en la librería del software de simulación matlab® simulink. Este prototipo ya ha sido implementado en diferentes paquetes de ordenadores como la Power Systems Toolbox que funciona en el ambiente de Simulink de MATLAB, ATP/EMTP, PSCAD-EMTDC, etc. La figura 4.61 muestra el tipo de la maquina sincrónica seleccionado de la librería de matlab.

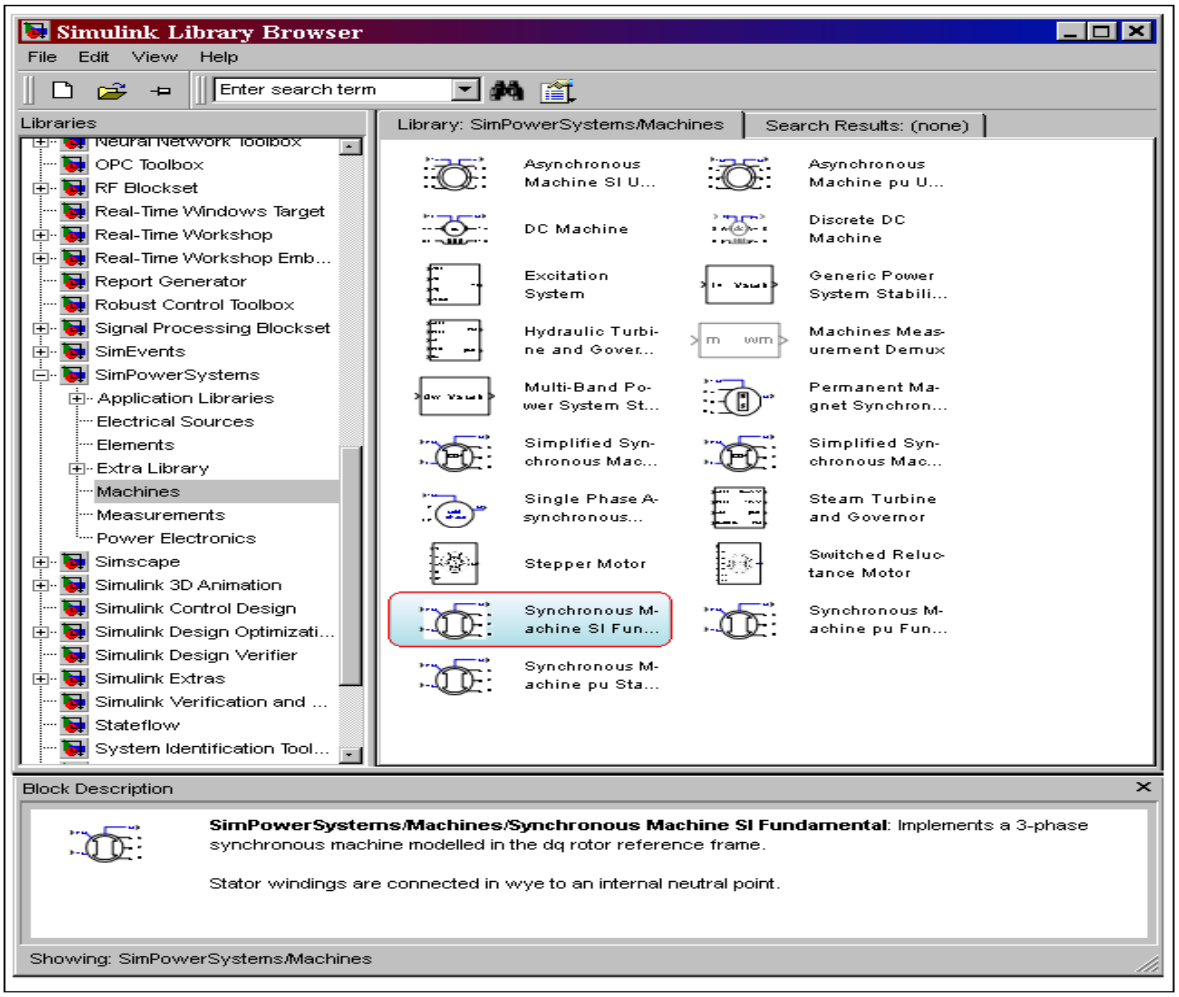



**Figura 4.61 Librería de matlab® simulink- maquina sincrónica**

Es de hacer notar que dentro de la librería de matlab® simulink se puede elegir entre tres bloques de maquina sincrónica para especificar los parámetros del modelo, simulan exactamente lo mismo, la única diferencia es la entrada de las unidades de los datos.

#### 4.6.2.1. Consideraciones del modelo matemático de la maquina sincrónica

En el desarrollo del modelo matemático de la máquina sincrónica fueron tomadas las siguientes consideraciones [34]:

a) Considerando los efectos mutuos entre el rotor y el estator, los devanados del estator están sinusoidalmente distribuidos a lo largo del entrehierro.

b) Las ranuras del rotor no causan una variación apreciable de las inductancias debidas a la posición del rotor.

c) La histéresis magnética es despreciable.

d) El modelo tiene en cuenta la dinámica del estator, el campo y devanados amortiguadores.

e) Todos parámetros de rotor y cantidades eléctricas son vistos del estator.

f) Las corrientes fluyen en los devanados del estator.

En la figura 4.62, muestra la estructura interna del modelo de la maquina sincrónica, compuesto por cuatros bloques; electrical model, mechanical model, powersysdomain, estos se encargan de ejecutar todos los cálculos de los parámetros de entrada suministrado por el usuario y se conectan con el bloque measurement list, para a través de este mostrar la información eléctrica o mecánica que el usuario necesite, como por ejemplo: corriente de línea, tensión de línea, corriente de campo, ángulo de carga, potencia eléctrica, numero de vueltas de la maquina, etc.

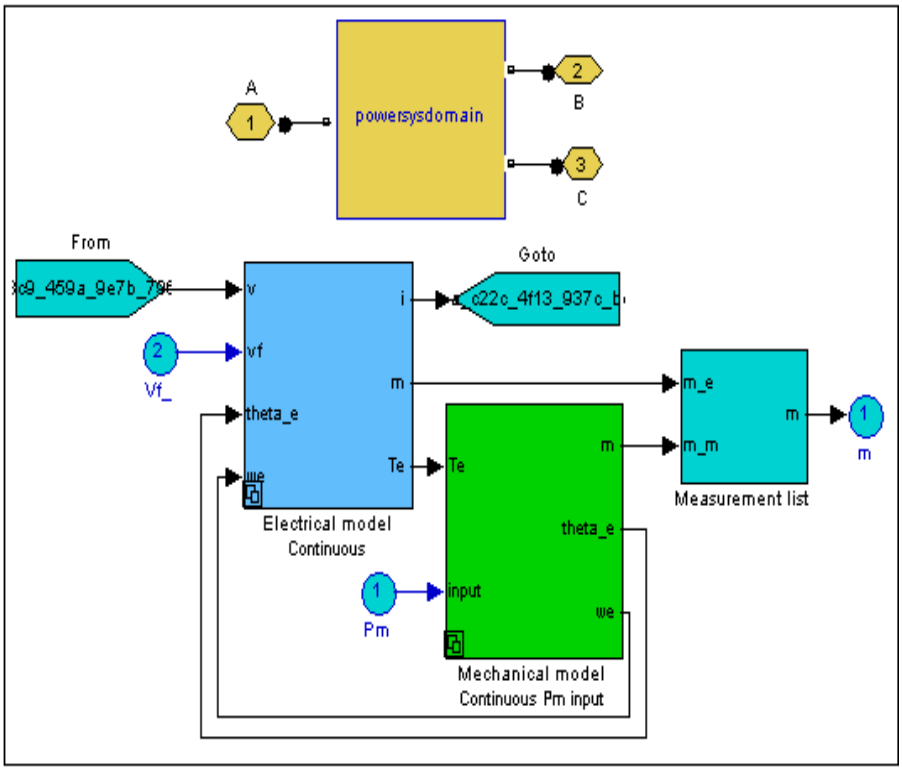



**Figura 4.62 Estructura interna de la maquina sincrónica en matlab® simulink-**

La figura 4.63 muestra toda la estructura del programa de modelación del motor de Combustión interna funcionando con biogás, acoplado a la maquina sincrónica trabajando como generador de energía eléctrica y sus respectiva carga al final de línea.

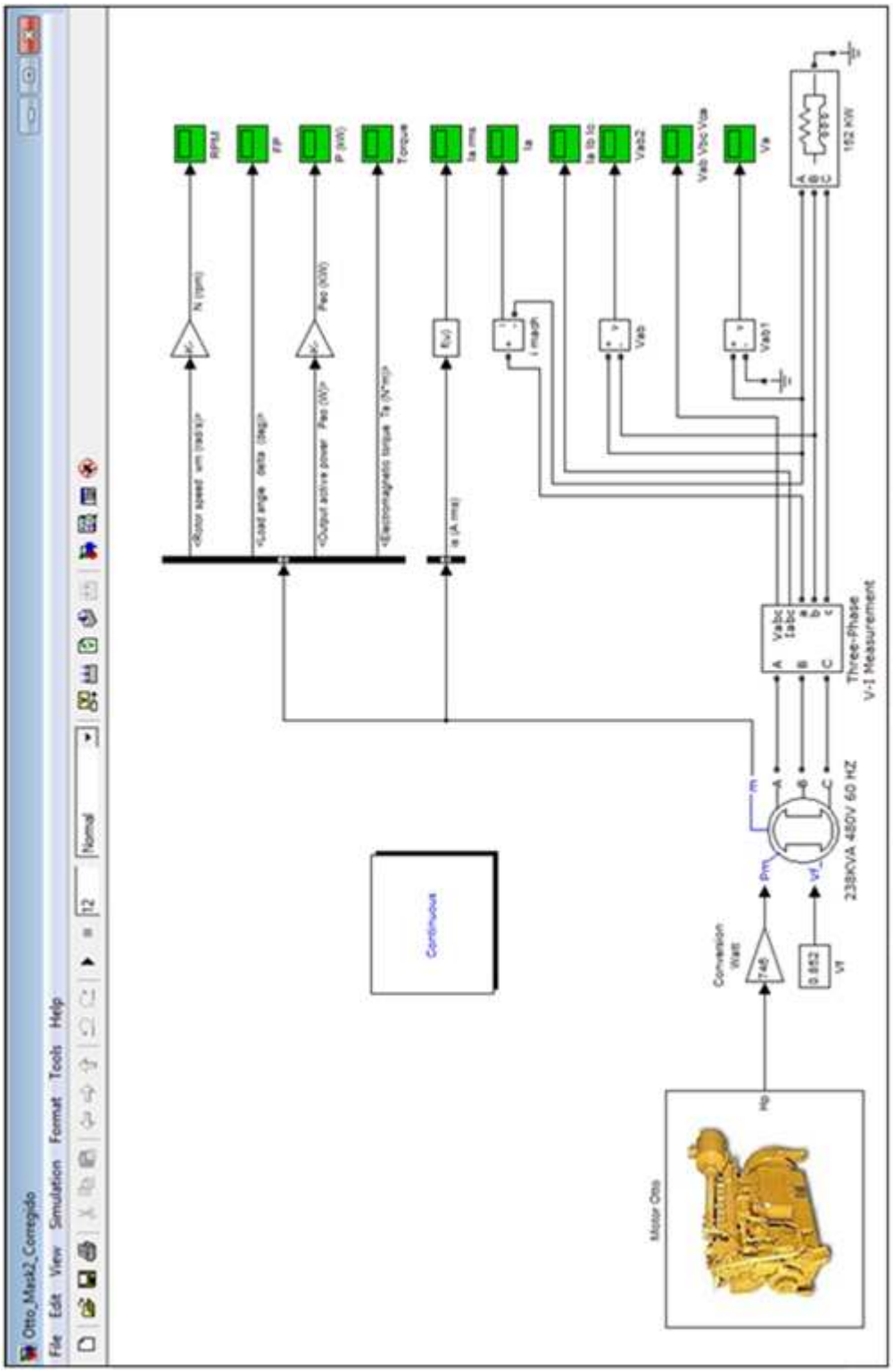



**Figura 4.63 Estructura del modelo motor-generador**

**4.6.3. Una vez construido el modelo en el software matlab®simulink, se procederá a introducir y/o ajustar los parámetros correspondientes del motor y el generador.**

#### 4.6.1.1. Introducción de los parámetros del motor

Para introducir los parámetros en el motor, el usuario deberá hacer doble clic en el icono del motor y se abrirá una ventana, como la siguiente, ver figura 4.64.

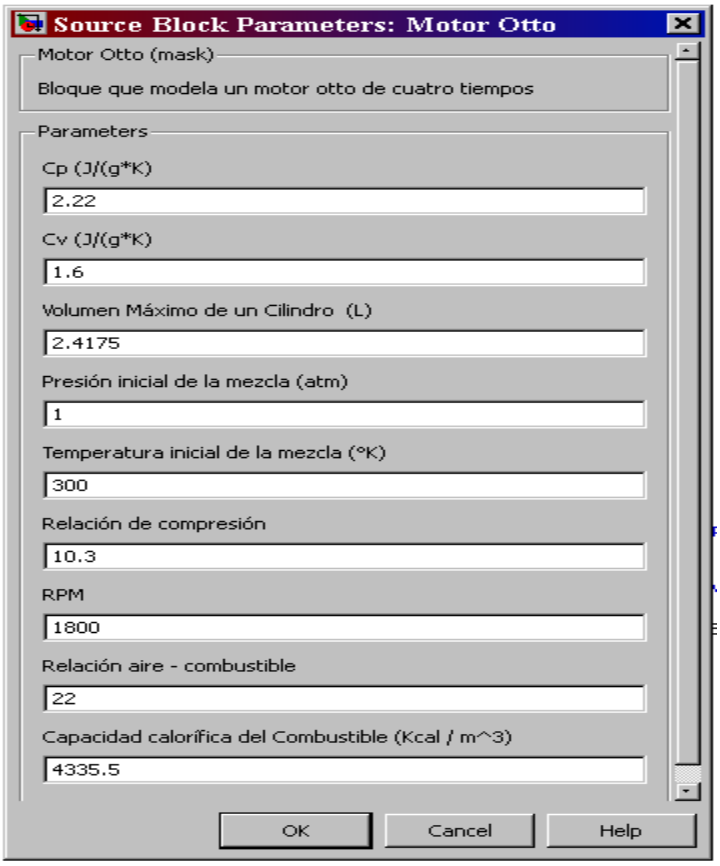



**Figura 4.64 Parámetros del Motor**

En esta ventana el usuario ingresara parámetros respectivos del motor, teniendo en cuenta sus respectivas unidades y sin omitir ningún dato. Ver tabla 89.

**Tabla 4. 29 Ingreso de datos en el motor de combustión interna**

| PARAMETRO | EXPLICACIÓN | VALOR |
|---|---|---|
| $C_p$ | La capacidad calorífica a presión constante y a volumen constante, son dos elementos característicos de cada gas, en este caso para el metano a una temperatura de 300 °K. | 2.22 $^{J}/_{g.K}$ |
| $C_v$ | | 1.6 $^{J}/_{g.K}$ |
| $V$ | El volumen máximo del cilindro es un parámetro que limita la cantidad de mezcla que entra al cilindro y es propio de cada motor. | 2.4175 L |
| $P$ | Se refiere al valor de presión al cual estará sometida la mezcla antes de entrar al cilindro motor. | 1 Atm |
| $T$ | Se refiere a la temperatura inicial de la mezcla aire-combustible antes de entrar al cilindro del motor. | 300°K |
| $\rho$ | La relación de compresión permite medir la proporción en que se comprime la mezcla aire combustible dentro del cilindro del motor. | 10.3 |
| $RPM$ | Se refiere al número de vueltas nominales en que gira el motor. | 1800 |
| $AFR$ | La relación aire combustible permite conocer la proporción de aire y combustible que están entrando al cilindro del motor. | 22 |
| $PCI_{CH4}$ | El poder calorífico del metano oscila entre 4.000 y 5550 kilocalorías por metro cubico. | 4335.5 $Kcal/_{m}$ |

**Fuente: Elaboración Propia**

#### 4.6.1.2. Introducción de los parámetros de la maquina sincrónica

Para introducir los parámetros en el mismo, el usuario deberá hacer doble clic en el icono del generador y se abrirá una ventana, como la siguiente, ver figura 4.65.

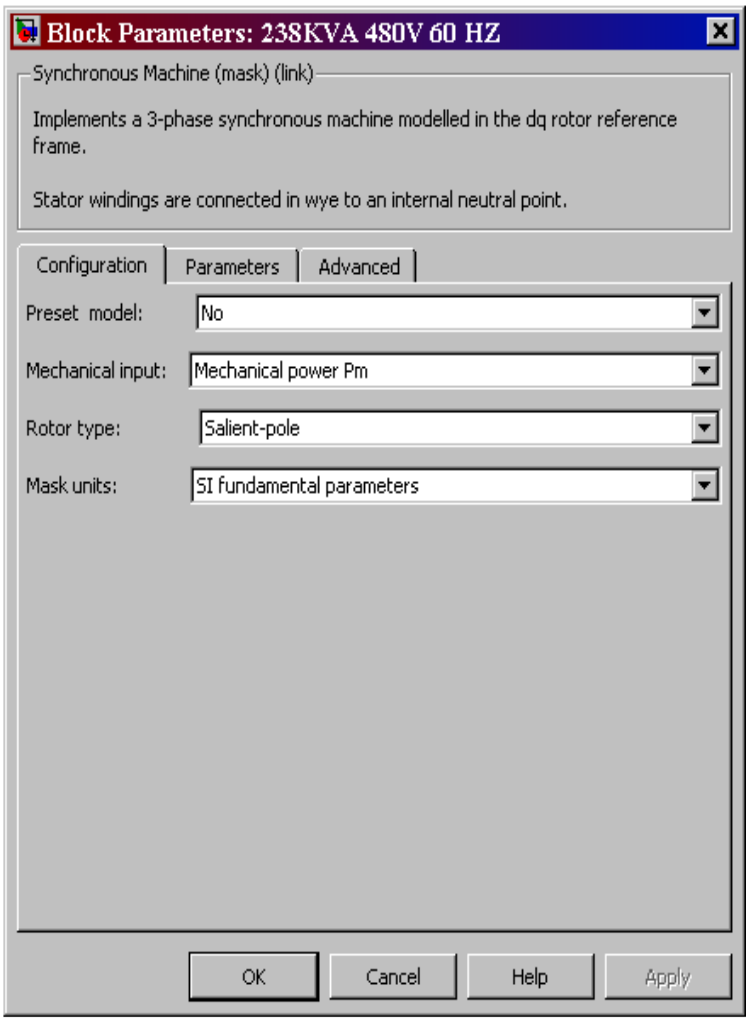



**Figura 4.65 Menú configuración del generador**

Una vez abierta esta ventana el usuario deberá pasearse por varios menús que ofrece la misma para insertar los parámetros correspondientes al generador. Por defecto esta ventana siempre se abre en el menú configuración, ver tabla 4.30.

**Tabla 4. 30 Ingreso de datos en el menú configuración de la maquina sincrónica**

| SUNB-MENU | OPCIONES | SELECCIÓN |
|---|---|---|
| **Preset model**<br>Este sub-menú proporciona un conjunto de parámetros eléctricos y mecánicos predeterminados de maquina sincrónica para diferentes valores de potencia (kVA), tensión de línea (V), frecuencia (Hz), y velocidad nominal (rpm). | **Modelo preestablecido:** Cuando el usuario selecciona esta opción se cargan automáticamente los valores eléctricos y mecánicos de la maquina sincrónica en el menú parámetro, dichos valores no puede ser modificados por el usuario ya que no se tiene acceso a ellos.<br><br>**No:** Se selecciona esta opción si no desea un modelo preestablecido, o si desea modificar alguno de los parámetros de un modelo preestablecido. | En esta investigación se selecciono la opción **no**, ya que ningún modelo cumplía con las características eléctricas de nuestro generador |
| **Mechanical input**<br>Este sub-menú permite seleccionar el par aplicado sobre el eje o la velocidad del rotor como la señal que simulink aplicara a la entrada del bloque de la maquina sincrónica. | **Mechanical power Pm:** Seleccione esta opción para especificar una aportación de energía mecánica a la entrada de la maquina sincrónica en vatios. La parte mecánica se impone a la velocidad de la mecánica.<br><br>**Speed w:** Seleccione para especificar una entrada de velocidad en el generador en rad/s. La velocidad se impone a la parte mecánica de la maquina. | Mechanical power Pm |
| **Rotor Type**<br>Este sub menú permite seleccionar el tipo de rotor de la maquina sincrónica. | **Salient – Pole:** Seleccione esta opción si la maquina sincrónica es de polos salientes.<br><br>**Round:** Seleccione esta opción si la maquina sincrónica es de rotor liso. | Maquina sincrónica de polos salientes. |
| **Mask unit**<br>Este sub-menú especifica las unidades de los parámetros eléctricos y mecánicos del modelo. | Este parámetro no es modificable, es para fines de información solamente. | |

**Fuente: Elaboración Propia**

Después de haber ingresado los valores en el menú configuración, hacer clic en el menú parámetros. Si se selecciono la opción **modelo preestablecido** en el submenú **preset model**, se abrirá una venta como la de la figura 4.66.

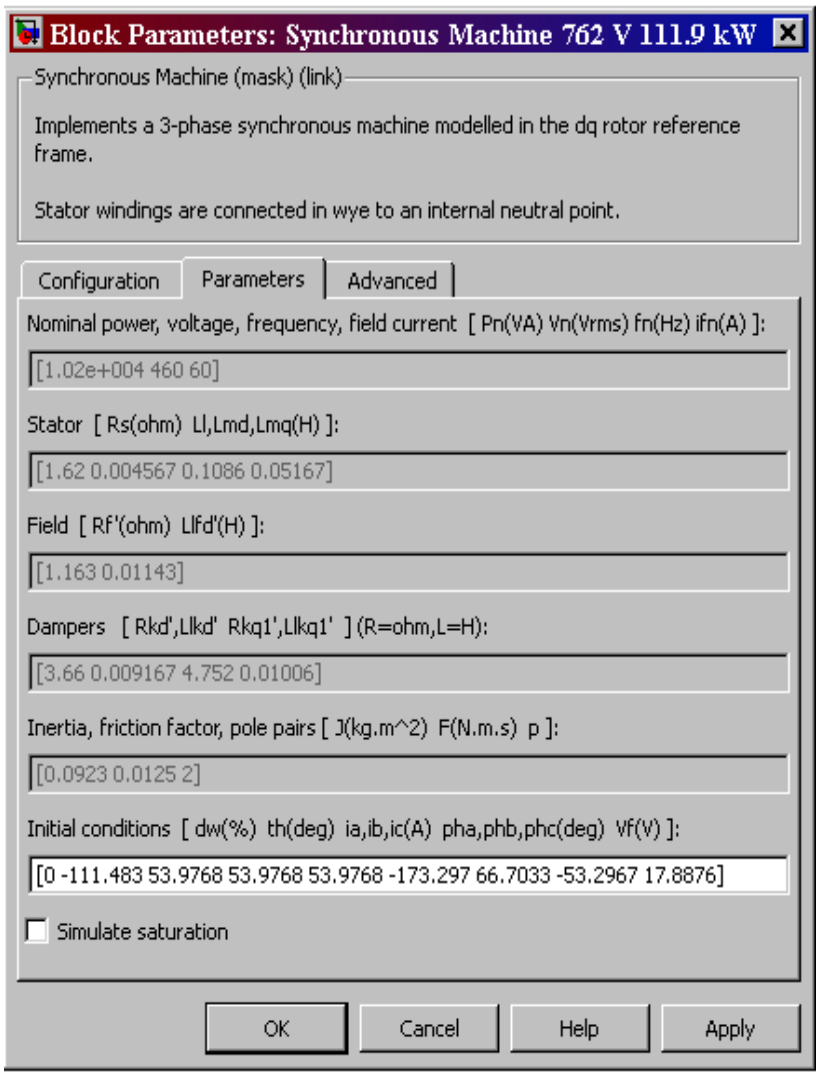



**Figura 4.66 Menú parámetros del generador**

En esta ventana el usuario solo puede modificar las condiciones iniciales de la maquina, ya que los demás parámetros están deshabilitados.

Si, se selecciono la opción **no** en el submenú **preset model**, se abrirá una venta como la de la figura 4.67.

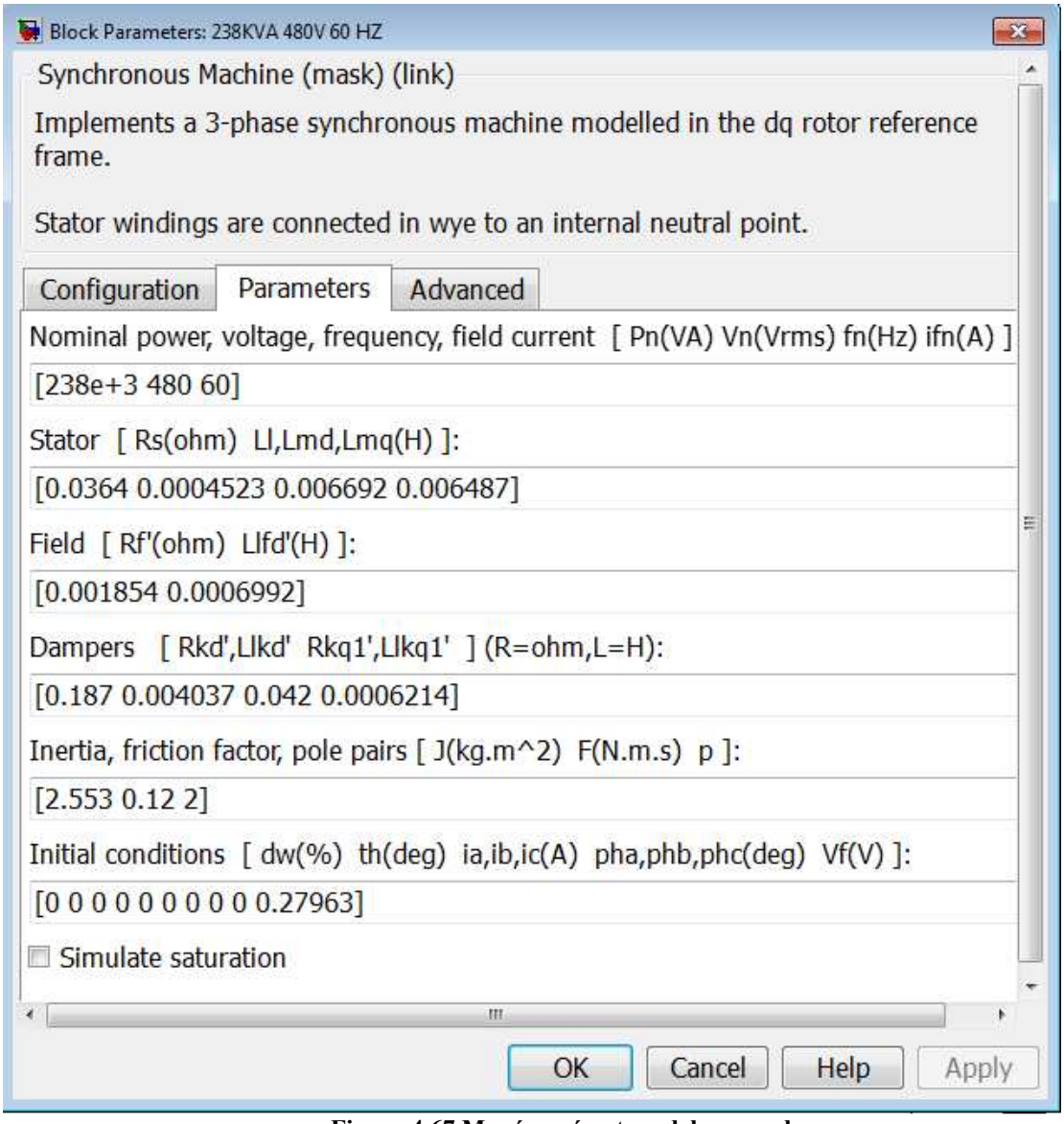



**Figura 4.67 Menú parámetros del generador**

En esta ventana el usuario puede ajustar cualquier parámetro eléctrico o mecánico que compone a la maquina sincrónica en este menú. La tabla 4.31 muestra como se ingresan los datos en la misma.

**Tabla 4. 31 Ingreso de datos en el menú parámetros de la maquina sincrónica**

| RENGLON | OPCIONES | SELECCIÓN |
|---|---|---|
| **Nominal** En este renglón el usuario ingresa los datos nominales de la maquina sincrónica. | Potencia Nominal (VA) | 238 KVA |
| | Voltaje de línea Nominal (V) | 480 V |
| | Frecuencia Nominal (Hz) | 60 Hz |
| | Corriente de campo nominal (A) | * |
| **Stator** En este renglón se colocan los datos eléctricos referentes al estator. | Rs: Resistencia del estator (Ω) | 0.0364 Ω |
| | Lls: Inductancia de fuga del Estator (H) | 0.0004523 H |
| | Lmd: Inductancia de magnetización del eje d | 0.006692 H |
| | Lmq: Inductancia de magnetización del eje q | 0.006487 H |
| **Field** En este renglón se colocan los datos eléctricos referentes al campo de inducción. | Rf: Resistencia de campo (Ω) | 0.001854 Ω |
| | Llfd: : Inductancia de fuga del (H) | 0.0006992 H |
| **Dampers** | Rkd' (Ω): Resistencia del eje d | 0.187 Ω |
| | Llkd (H): Inductancia de fuga del eje d | 0.004037 H |
| | Rqk1(Ω): Resistencia del eje q | 0.042 Ω |
| | Llkq1' (H): Inductancia de fuga del eje q | 0.0006214 H |
| **Mechanical:** En este renglón se colocan los datos mecánicos referentes a la maquina sincrónica. | Inercia (kg.m²) | 2.553 kg.m² |
| | Factor de fricción (N.m.s) | 0.12 N.m.s |
| | Pares de polo (P) | 2 |
| **Initial conditions:** En este renglón se especifican las condiciones iniciales al momento de arrancar la maquina sincrónica. | dw(%): Porcentaje desviación de la velocidad inicial. | 0 |
| | th (grados): Angulo eléctrico del rotor | 0 ° |
| | Ia, Ib, Ic (A): magnitudes de la corrientes de fase | [0, 0, 0] A |
| | Øa, Øb, Øc: Angulo de las corrientes de fase | [0, 0, 0] A |
| | Vf (V): Tensión de campo inicial | ** |

**Fuente: Elaboración Propia**

*** Se deja en blanco o se coloca cero si no se posee**
**** Ver menú Advanced**

Si el usuario no posee la tensión del campo al inicio del trabajo del generador, puede hacer clic en el icono del menú **advanced** y se abrirá una ventana como la de la figura 4.68.

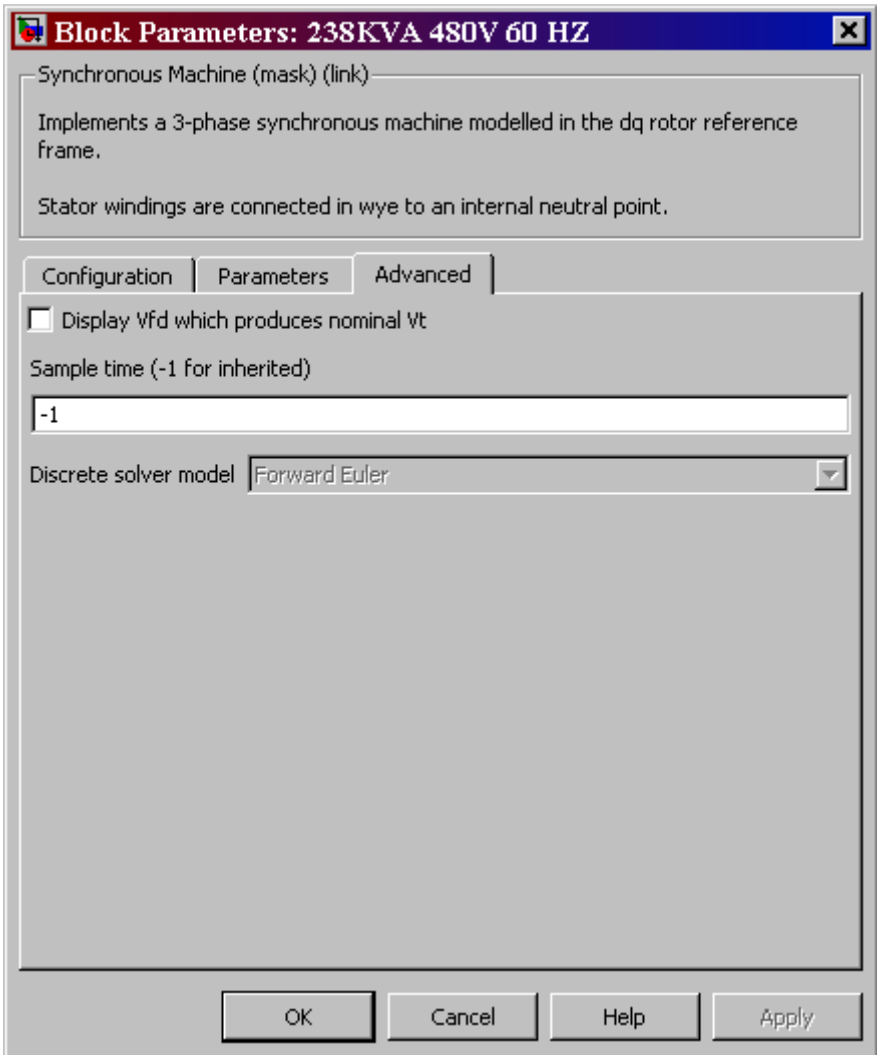



**Figura 4.68 Menú parámetros del generador-Advanced**

Haciendo clic en el cuadro superior izquierdo, el programa automáticamente le proporciona un valor de campo inicial de referencia, para este caso en particular 0.27963.

2. **Obtención de resultados. En el caso particular de esta investigación, la información que se extrae de la simulación es la siguiente.**

Graficas de todas las variables eléctricas, niveles de tensión, corriente y potencia requeridos para la alimentación del sistema.

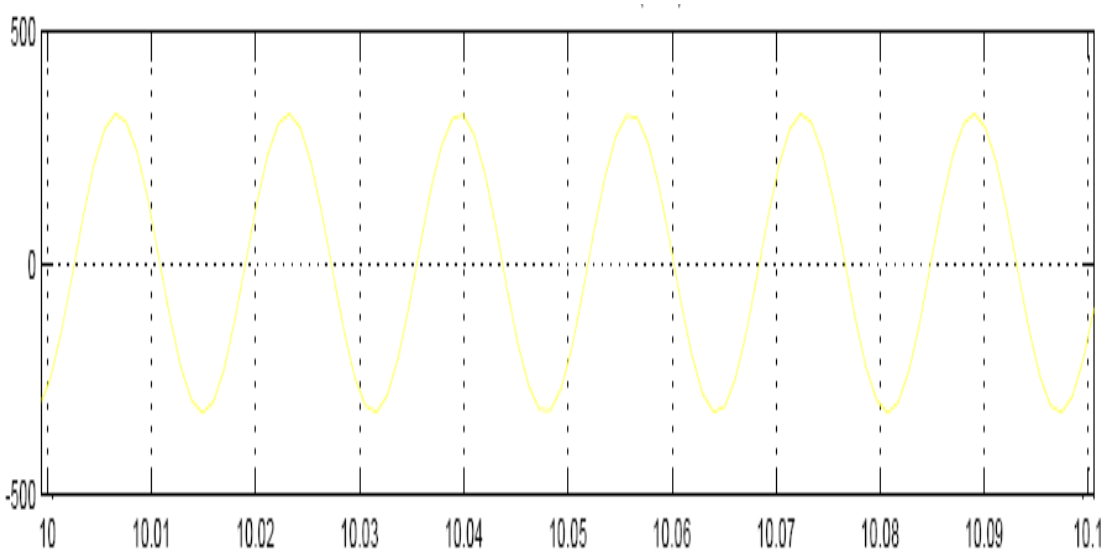



**Figura 4.69 Grafica de la corriente de línea Ia**

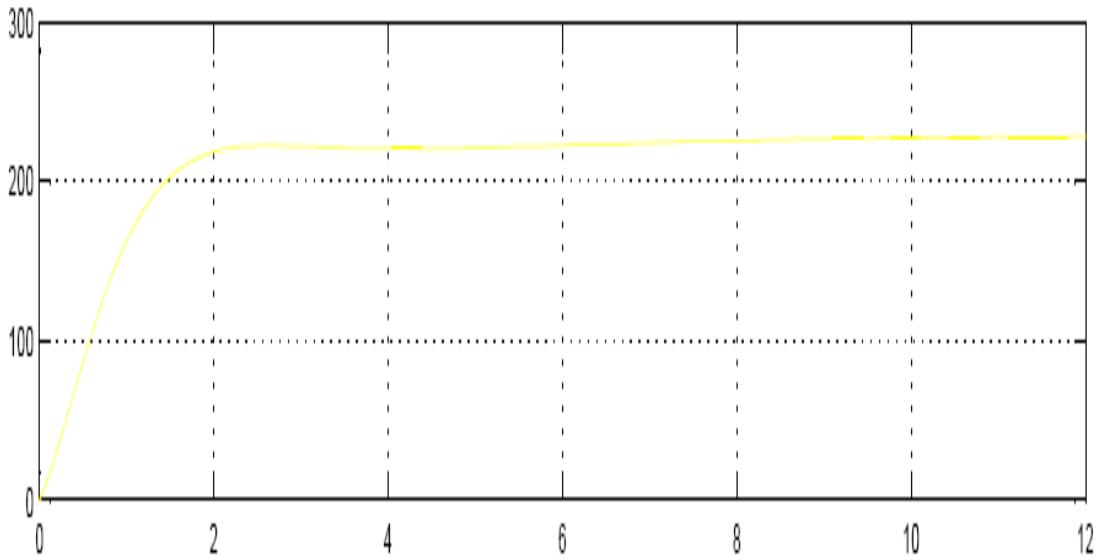



**Figura 4.70 Grafica de la corriente de fase Ia RMS**

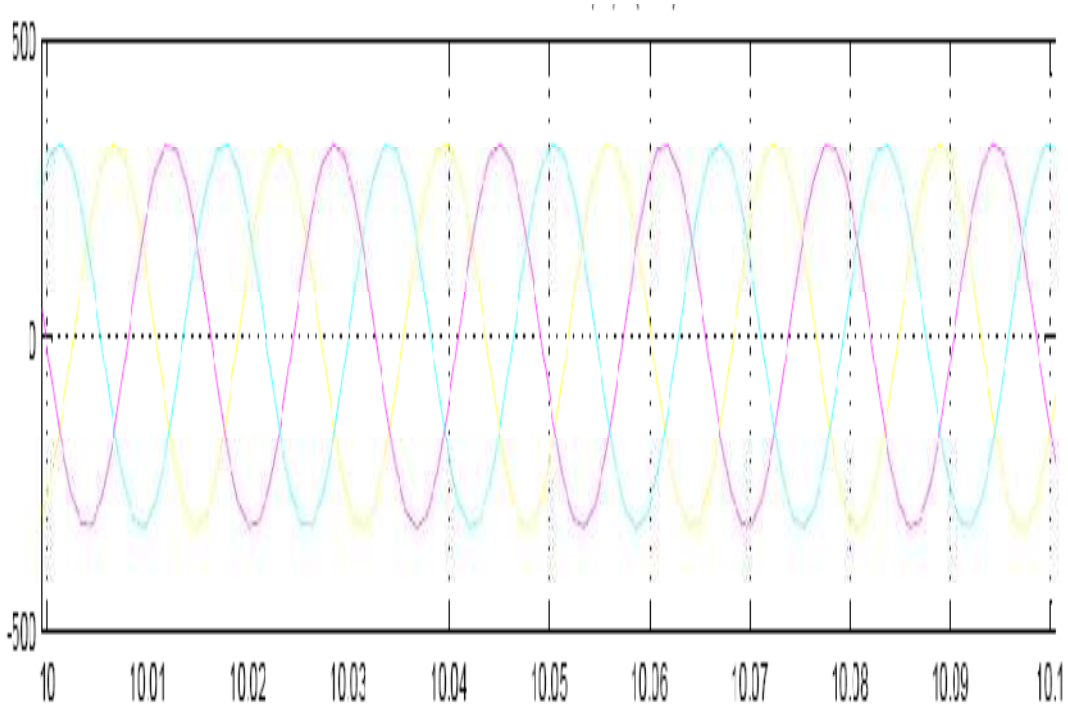



**Figura 4.71 Grafica de la corriente de línea Ia, Ib, Ic**

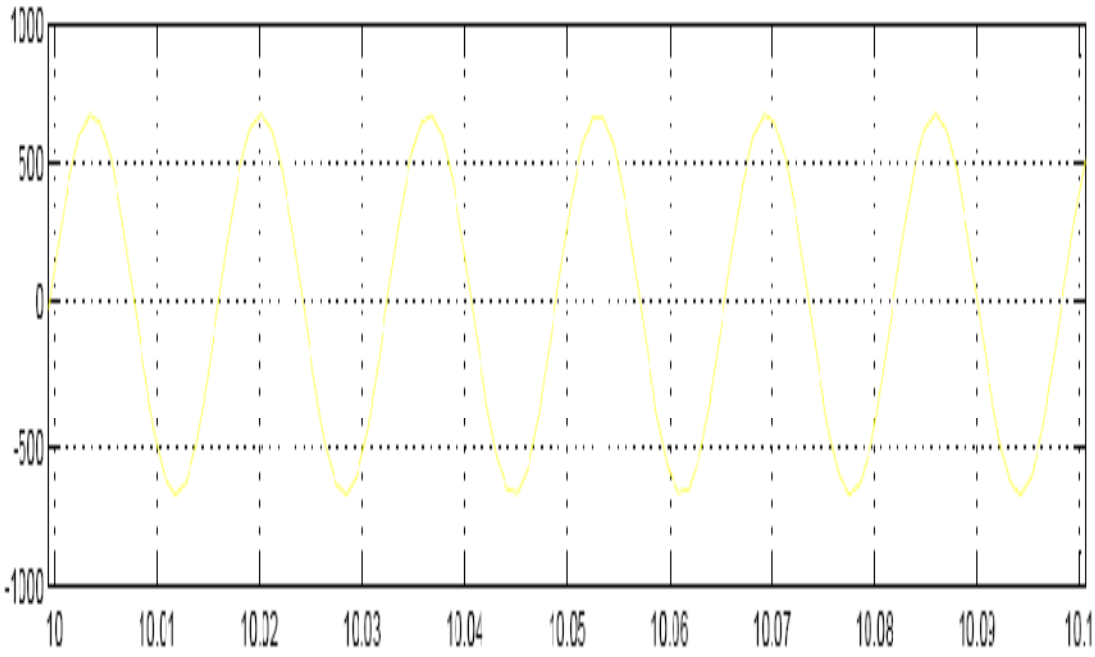



**Figura 4.72 Grafica de la tensión de línea Va**

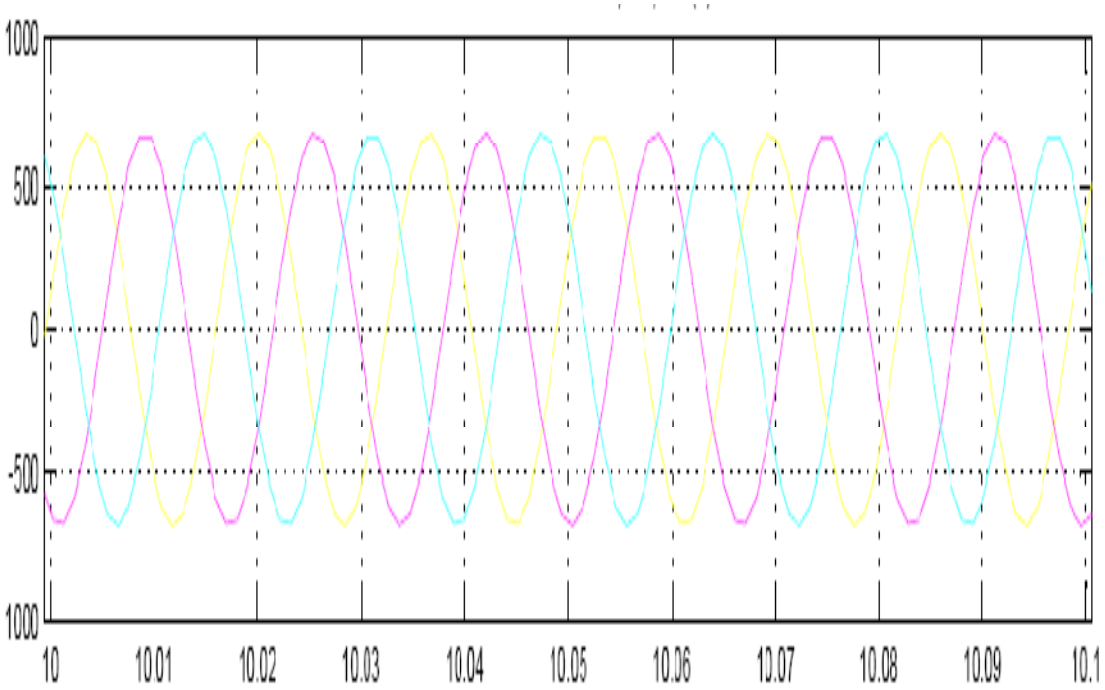



**Figura 4.73 Grafica de la tensión de línea Va, Vb, Vc**

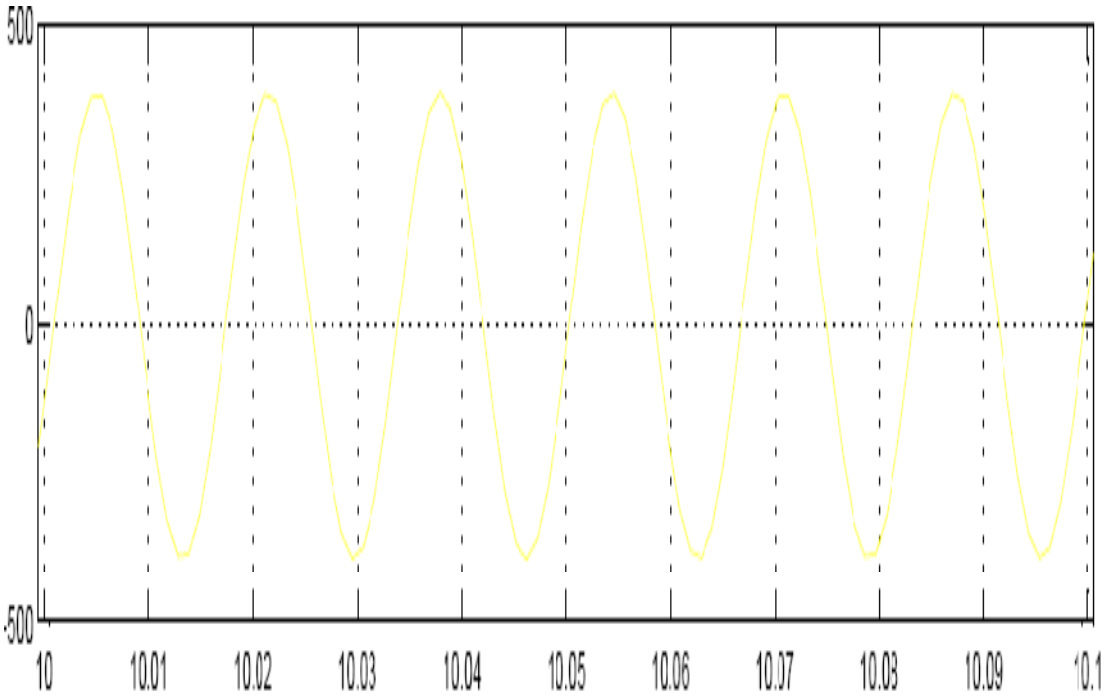



**Figura 4.74 Grafica de la tensión de fase Va**

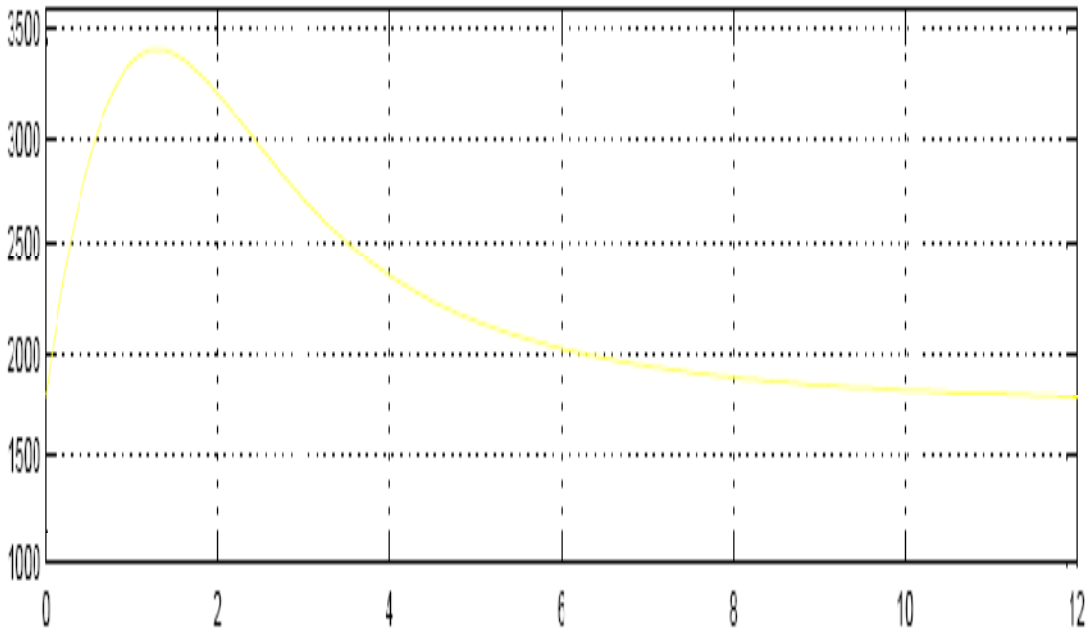



**Figura 4.75 Grafica del numero de vueltas de la maquina en RPM**

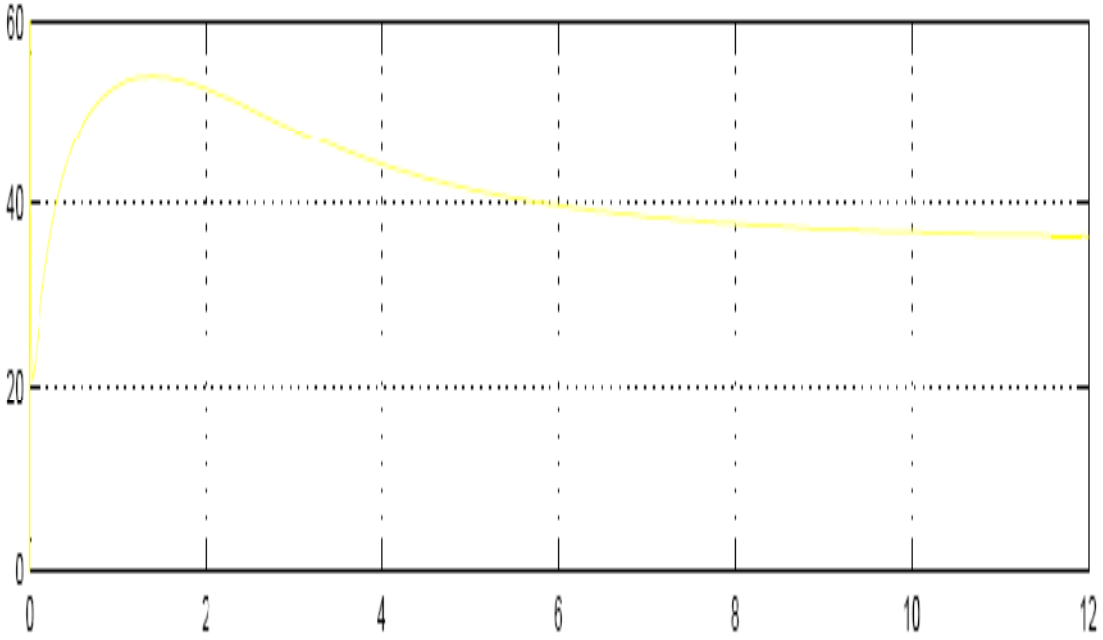



**Figura 4.76 Grafica del Angulo de carga de la maquina sincrónica**

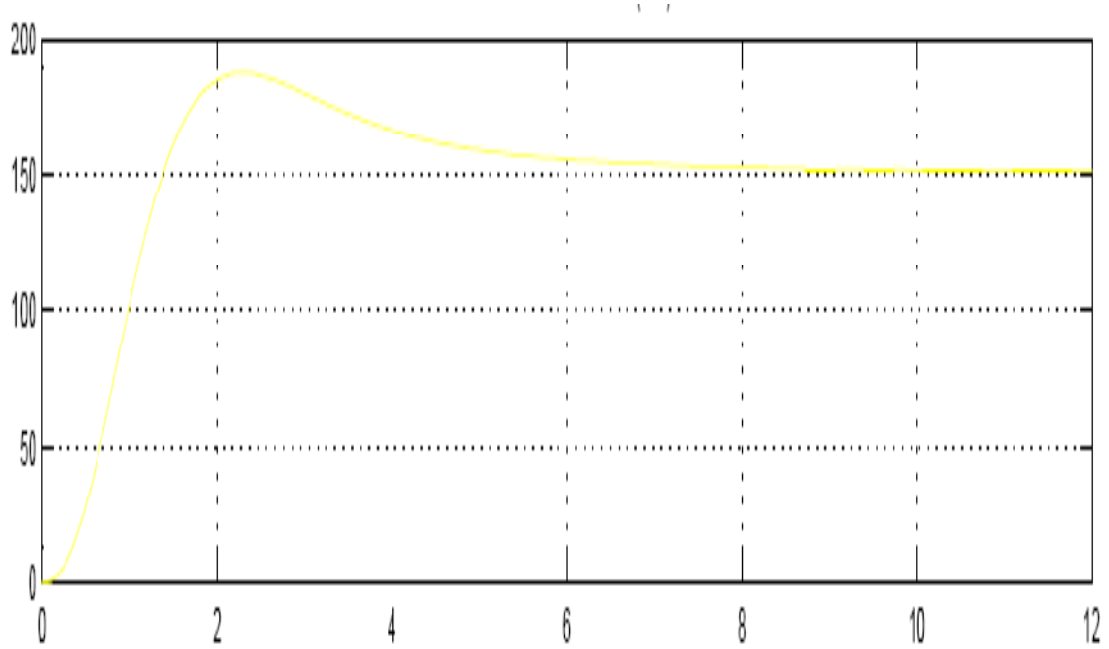



**Figura 4.77 Grafica de la potencia activa (KW)**

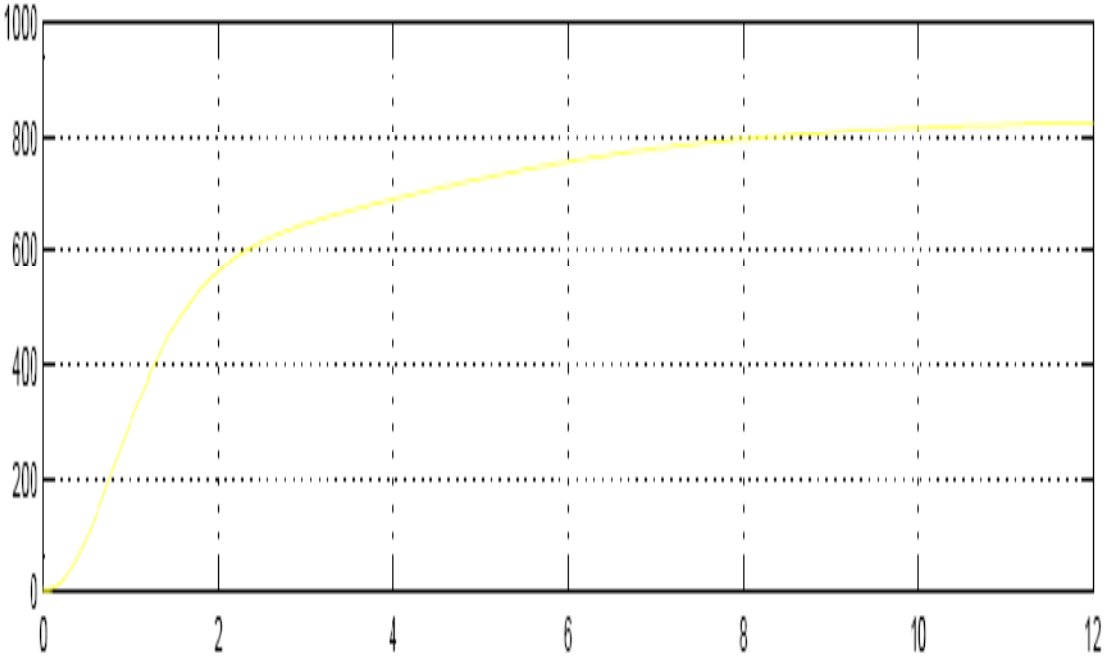



**Figura 4.78 Grafica del torque eléctrico (N.m)**

## FASE VII SELECCIONAR LOS EQUIPOS QUE COMPONEN LA PLANTA DE BIOGAS

### 4.7.1. Selección de los equipos que forman parte de las estructuras dimensionadas en la fase III, los cuales se mencionan a continuación.

#### 4.7.1.1. Agitadores del tanque de biodigestion

La planta de biogás contara con dos biodigestores de hormigón con capacidad de 1.357,03 m³, ver tabla 4.18, a su vez cada tanque de biodigestion tendrá en su interior dos agitadores de palas gigantes doble, ver anexo 10, capaces de homogenizar la mezcla de biomasa de ganado vacuno al 10% y agua al 90% mientras se produce el proceso de producción de biogás dentro del mismo.|

Estos agitadores operaran a una velocidad no mayor de 0,2 m/s en periodos de diez minutos y se encenderán entre 15 a 20 veces por día, esto con el fin de no inhibir el proceso de producción de biogás ya que las bacterias metanogenicas que son las encargadas de producir metano son muy sensibles a cambios de temperatura y acidez.

Los agitadores permitirán una mejor extracción del biogás, ya que durante el proceso de digestión se forman burbujas de biogás que quedan atrapadas en la mezcla y no se sueltan, sin antes ser sometidas a una leve agitación, además mejorara la distribución de calor y nutrientes en el interior del biodigestor a través de la mezcla de la biomasa fresca con la biomasa digerida existente en el tanque de biodigestion.

Características a tener a consideración para determinar la potencia del agitador del tanque de biodigestion.

- La capacidad de cada tanque de alimentación es de 1.357,03 m³.
- Se colocará 2 agitadores de palas gigantes dobles, por cada tanque capaz de mover un volumen de 1.357,03 m³.
- Cada agitador moverá un volumen de mezcla de 680 m³.

A continuación se determina la potencia y el tipo de agitador a través de las tablas y catálogos de los fabricantes de mezcladores industriales ABS.

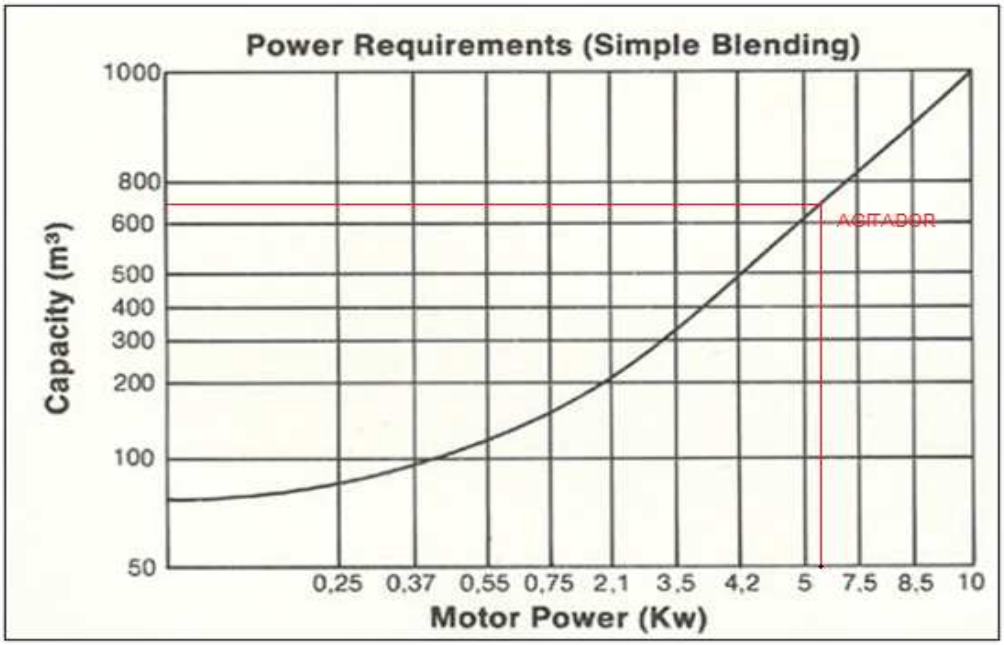



**Figura 4.79 Curva de Potencia Vs Volumen para la selección de Agitadores Industriales**

De la grafica de la figura 4.79, se puede apreciar que para un volumen de 680 m³, el motor del agitador tiene que tener una potencia de 6kW. Para que el seleccionamiento del mismo sea aun más confiable, aplicaremos un factor de seguridad del 15%, con lo que queda:

$$P.Agitador_{(kW)} = 1{,}15 * 6kW = 6{,}9Kw$$

A partir de este valor de potencia se puede determinar mediante tablas de fabricantes, el agitador adecuado para el tanque de biodigestion, teniendo en cuenta que la frecuencia y tensión del sistema tienen que ser de 60 Hz y 480V, respectivamente, además la velocidad no puede ser mayor de 0,2m/s.

El Agitador seleccionado en esta investigación es el ABS SCABA serie SVVPT de accionamiento por motoreductor, con variador mecánico CMGV e impulsor ABS-SCABA SHP17, diseñado para la homogenización de mezclas compuesta por líquidos y sólidos de gran y volumen con viscosidades menores a 25000mPas.

**Tabla 4.32 Selección de Agitadores**

| | velocida maxima | | | velocida minima | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ [kW] | $n_2$ [$min^{-1}$] | $M_2$ [Nm] | sf | $n_2$ [$min^{-1}$] | $M_2$ [Nm] | sf | i | |
| **7** | | | | | | | | |
| 63C4 $n_1$=1800 [$min^{-1}$] | **9.7** | 174 | 3.2 | **1.9** | 348 | 1.7 | 97.45 | CMGV |
| | **8.2** | 207 | 2.7 | **1.6** | 413 | 1.4 | 115.74 | 063/060 |
| | **6.7** | 251 | 2.2 | **1.3** | 503 | 1.1 | 140.81 | Agitador seleccionado |
| | **5.5** | 311 | 1.8 | **1.1** | 622 | 0.9 | 174.26 | |
| | **4.2** | 403 | 1.4 | **0.8** | 805 | 0.7 | 225.47 | |
| | **3.6** | 468 | 1.2 | **0.7** | 936 | 0.6 | 262.05 | |

**Fuente: ABS-SCABA**

**Figura 4.80 Agitador industrial ABS-SCABA serie SVVPT**

**Tabla 4.33 Características técnicas del agitador ABS-SCABA serie SVVPT**

| **Engine** | |
|---|---|
| Voltage [V] | 480 |
| Tolerance of Voltage [%] | +5/-5 |
| Power [KW] | 7 |
| Power [kVA] | 8,75 |
| Factor of Power | 0,8 |
| Frequency [Hz] | 60 |
| Poles nro | 4 |
| Type of thermal sensor | PTC |
| Temperature of desconexión thermal sensor | 130 |
| Protection grade | IP68 |
| Isolation class | H |
| Maximum depth of installation [m] | 25 |
| Maximum temperature of liquidate [°C] | 45 |
| Number Maximum of starts/ stopped a hour | 20 |
| Terminal board position | T4 |
| **Gearbox** | |
| Type | CMGV |
| Size | 0,63/0,60 |
| Ratio | 428,6 |
| Version | H75 |
| Mounting position | B5/1 |
| **Drive** | |
| Type | ABS–SPH17 |
| Size of the paddle | 1,5/0,3 |

**Fuente: ABS-SCABA**

**Figura 4.81 Motoreductor ABS SCABA-CMGV**

**Figura 4.82 Impulsor ABS SCABA-SHP17**

#### 4.7.1.2. Mezclador del tanque de alimentación

La planta de biogás constara de dos tanques de alimentación de forma circular con radio de 5,21 m y una altura de 1,20 m, ver anexo 3 y 4, a su vez cada tanque tendrá en su interior un mezclador capaz de homogenizar la mezcla de biomasa de ganado vacuno al 10% y agua al 90% antes de introducirla al biodigestor.

Esto se hace con el fin de permitir que la mezcla permanezca primero un tiempo dentro del tanque de alimentación con un ambiente y temperatura parecido al que encontrara en el biodigestor, ya que un choque térmico fuerte puede ser fatal para las bacterias y reprimir el proceso de producción de biogás dentro del biodigestor.

Características a tener a consideración para determinar la potencia del mezclador del tanque de alimentación.

- La capacidad de cada tanque de alimentación es de 25,59 $m^3$.
- Se colocará 1 mezclador por cada tanque capaz de mover un volumen de 25,59 $m^3$.
- El contenido de sólidos dentro de la biomasa será menor al 3%, de fácil dilución en el agua.

A continuación se describen una serie de pasos recomendados por los fabricantes de mezcladores Grundfos, a tener en consideración para la elección de los mismos.

Paso 1:

- Seleccionar la curva que más se adapte a las necesidades del proyecto, ver figura 4.83, en este caso se elegirá la aplicación 2.

Paso 2

- Ubicar el volumen del tanque en la curva seleccionada de la gráfica, para esta investigación 26,6 m³.

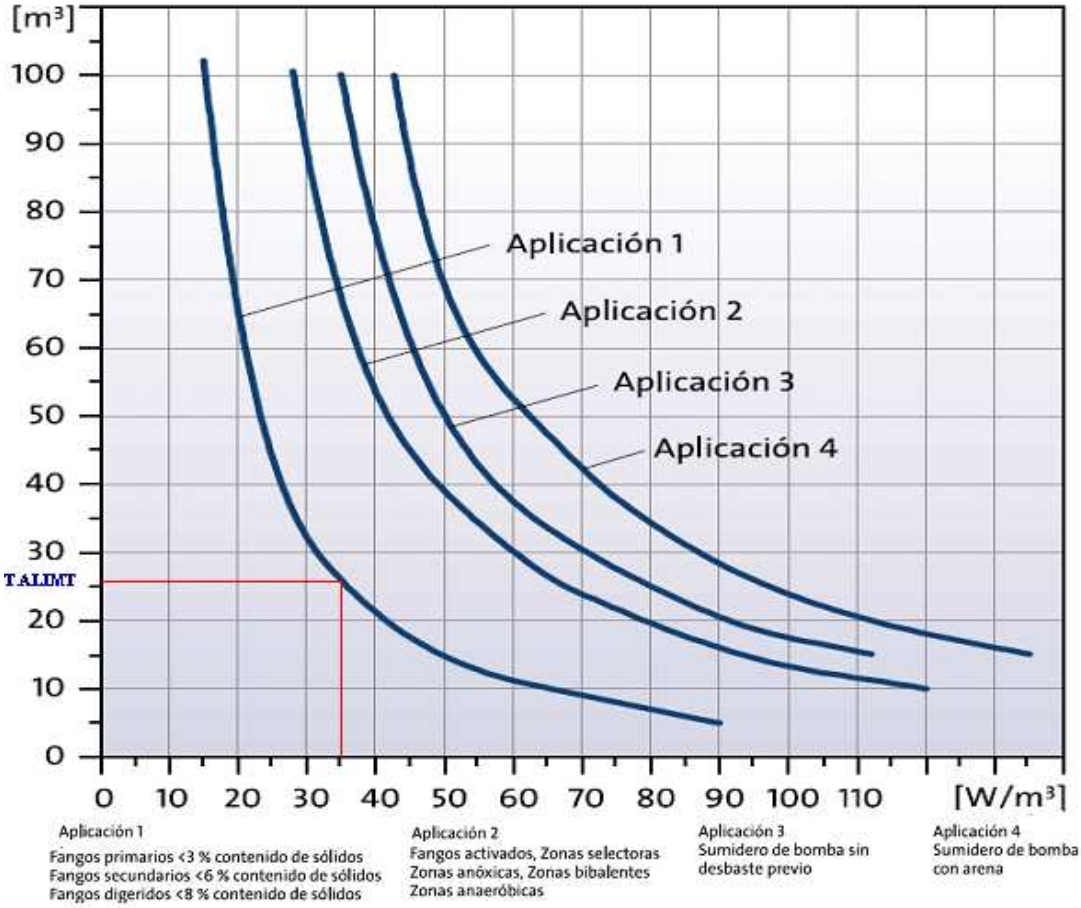



**Figura 4.83 Curva de selección de Aplicación para los Agitadores Grundfos**

Paso 3

- Utilizar el diagrama de curva para determinar la energía necesaria, 35 W/m³.

Paso 4

- Calcular la potencia de entrada necesaria, utilizando la siguiente fórmula:

$$KW = \frac{E_{Necesaria}\left(W/_{m^3}\right) * V_{Tanque}(m^3)}{1000}$$

$$KW_{Mesc.T.Aliment} = \frac{35\left(W/m^3\right) * 25{,}6(m^3)}{1000} = 0{,}896kW$$

Paso 5

- Con los KW calculados anteriormente seleccionar mediante las tablas ofrecidas por el grupo de fabricantes de bombas Grundfos, el agitador correspondiente.
-

**Tabla 4.34 de selección de Agitadores Grunfos**

| Tipo de agitador | Potencia de motor $P_2$ [kW] | Longitud máx. del tanque para un agitador [m] | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Aplicación 1 | Aplicación 2 | Aplicación 3 | Aplicación 4 |
| AMD.07.18.1410 | 0.75 | 6 m | 2.5 m | 2.0 m | 1.5 m |
| AMD.15.45B.710 | 1.50 | 16 m | - | 5.5 m | 4.5 m |
| AMD.25.45B.690 | 2.50 | 20 m | - | 6.0 m | 5.0 m |
| AMD.35.45B.705 | 3.50 | 24 m | - | 6.5 m | 5.5 m |
| AMD.45.45B.675 | 4.50 | 28 m | - | 7.0 m | 6.0 m |
| AMD.20.45.700 | 2.00 | 16 m | 11 m | 5.0 m | 4.5 m |
| AMD.30.45.710 | 3.00 | 20 m | 13 m | 6.0 m | 5.0 m |
| AMD.40.45.695 | 4.00 | 24 m | 14 m | 6.5 m | 5.5 m |
| AMG.15.40.325 | 1.50 | 20 m | 10 m | 5.5 m | 4.0 m |
| AMG.22.45.325 | 2.20 | 22 m | 11 m | 6.0 m | 4.5 m |
| AMG.30.47.328 | 3.00 | 24 m | 12 m | 6.5 m | 5.0 m |
| AMG.40.52.326 | 4.00 | 26 m | 13 m | 7.0 m | 5.5 m |
| AMG.55.50.335 | 5.50 | 31 m | 15 m | 8.6 m | 6.0 m |
| AMG.75.58.336 | 7.50 | 37 m | 18 m | 10.0 m | 7.5 m |
| AMG.110.68.334 | 11.00 | 45 m | 22 m | 12.5 m | 9.0 m |
| AMG.150.73.354 | 15.00 | 55 m | 27 m | 15.0 m | 11.0 m |
| AMG.185.78.351 | 18.50 | 65 m | 30 m | 18.0 m | 13.0 m |

GRUNDFOS

El agitador seleccionado para el tanque de alimentación es el **AMD.15.45B.710**

**Figura 4.84 Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos**

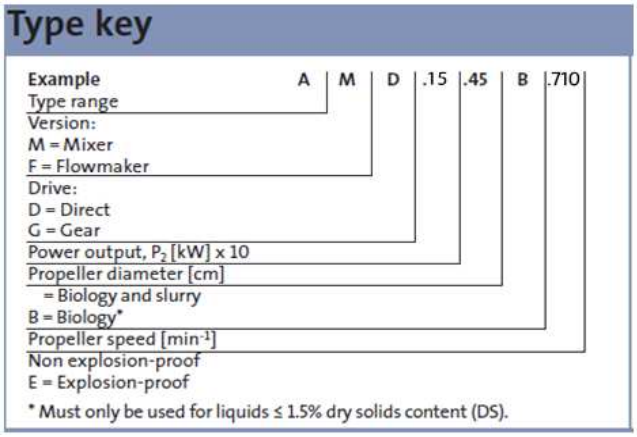



**Figura 4.85 Denotación de los parámetros del Agitador Grunfos**

## Datos eléctricos

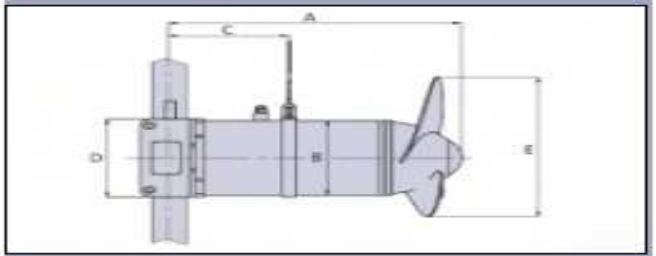
| | |
|---|---|
| Tensión de la red [V] | 3 x 480 |
| Tolerancia de tensión [%] | +6/ -10 |
| Frecuencia necesaria de la red [Hz] | 60 |
| Tipo de sensor térmico | PTC o PTO |
| Temperatura de desconexión del térmico [°C] | 130 |
| Grado de protección | IP 68 |
| Clase de aislamiento | F |
| Profundidad máx. de instalación [m] | 20 |
| Temperatura máx. del líquido [°C] | 40 |
| Número máx. de arranques/paradas a la hora | 20 |
| Longitud de cable [m] | 8 |

* Sólo puede utilizarse para líquidos con contenido de sólidos secos (DS) < 1.5

**Figura 4.86 Características Eléctricas del Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos**

Dimensiones

## Agitadores tipo AMD.XX.45.XXX




| Tipo | Dimensiones [mm] | | | | | Peso 1) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | |
| AMD.15.458.710 | 456 | 210 | 175 | 210 | 450 | 50 |
| AMD.25.458.690 | 456 | 210 | 175 | 210 | 450 | 50 |
| AMD.35.458.705 | 491 | 210 | 193 | 210 | 450 | 59 |
| AMD.45.458.675 | 491 | 210 | 193 | 210 | 450 | 59 |
| AMD.20.45.700 | 456 | 210 | 175 | 210 | 450 | 50 |
| AMD.30.45.710 | 491 | 210 | 193 | 210 | 450 | 59 |
| AMD.40.45.695 | 491 | 210 | 193 | 210 | 450 | 59 |

**Figura 4.87 Dimensiones del Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos**

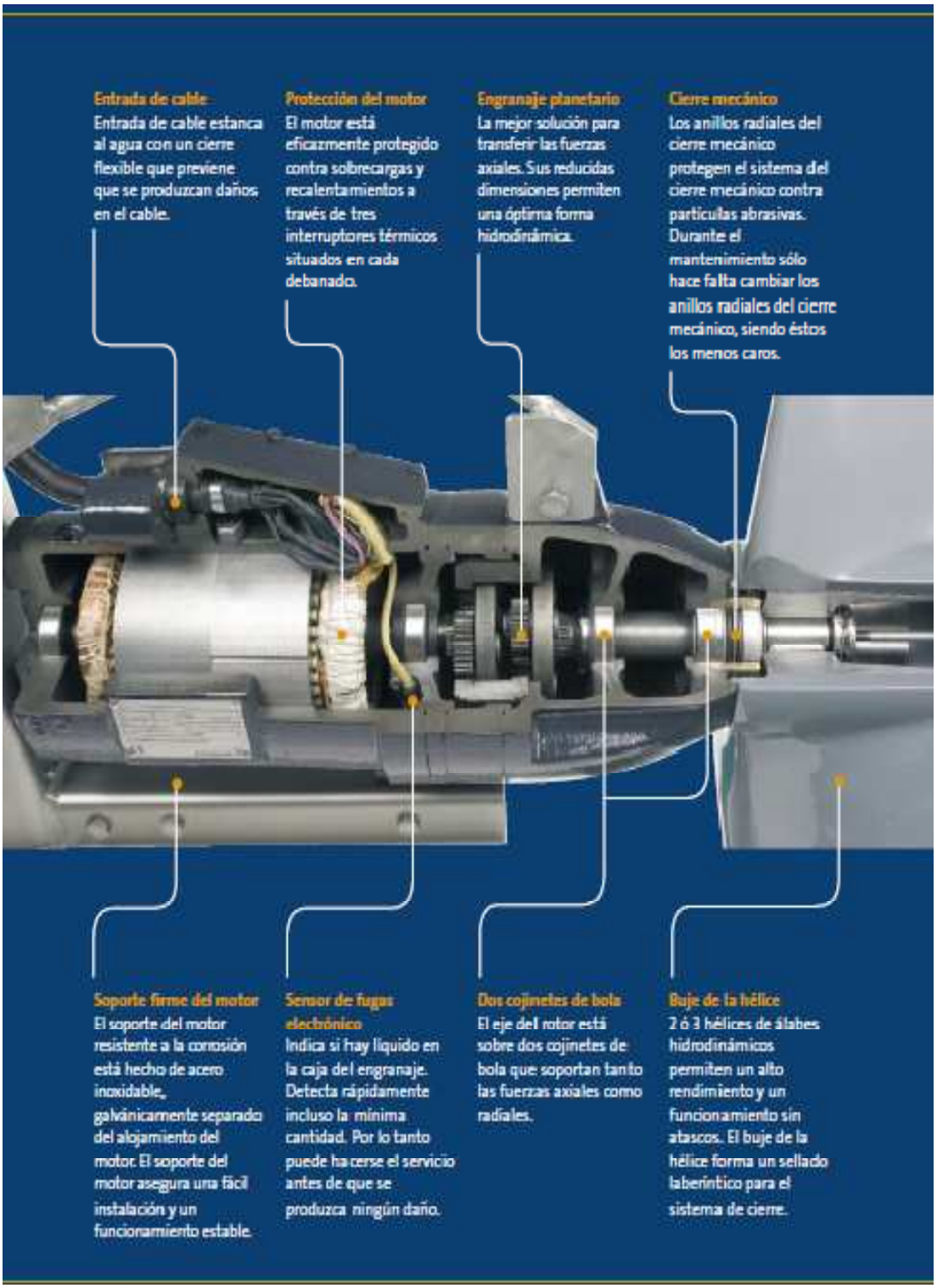



**Figura 4.88 Características constructivas del Agitador AMD.15.45B.710 Grunfos**

#### 4.7.1.3. Tuberías de alimentación y descarga de la planta de biogás

En este punto se presentan los diámetros de las tuberías de alimentación de biomasa, descarga de biol, descarga de lodos, circulación de biogás y recirculación de biol que serán utilizadas en la planta de generación de potencia a través del biogás, ver anexos 2, 3 y 4. Las mismas serán de cloruro de polivinilo (PVC), y entre las razones por las cuales se tomo este material, se pueden mencionar las siguientes;

- Resistencia química: Las tuberías de PVC han mostrado tener una gran resistencia al ataque de sustancias químicas utilizadas en procesos industriales son también utilizadas para conducir ácidos, solventes, bases y otros líquidos corrosivos que afectarían a materiales tradicionales.

- Resistencia al ataque biológico: Se define como la degradación o daño causado por la acción de micro o macro organismos; como por ejemplo las bacterias, hongos y raíces, respectivamente, se ha demostrado que el ataque de especies carece de importancia por no existir en el PVC materia nutriente para el desarrollo de éstos.

- Flexibilidad – Liviana: Las tuberías de PVC poseen un menor módulo de elasticidad que las tuberías tradicionales, lo que le confiere una mayor flexibilidad y con ello un mejor comportamiento frente a los siguientes esfuerzos; movimientos sísmicos, sobrepresiones, cargas externas al estar enterradas.

- Resistencia al impacto: Las características propias del material, le permiten a las tuberías de PVC asimilar las fuerzas de impacto que puedan presentarse

durante la manipulación, transporte e instalación, soportando incluso el vaciado de placas de concreto.

- Economía: Ofrecen una interesante economía para las obras, ya que el mantenimiento es casi despreciable por su alta resistencia a la corrosión y sus bajos coeficientes de fricción permiten la utilización diámetros menores de tuberías.

Los valores que se muestran a continuación son los diámetros de las tubería sugeridos por el programa BIODIGESTOR© para el diseño de la planta.

**Tabla 4.35 Especificaciones de diámetro de tuberías**

| TUBERIA PVC | DESDE | HASTA | DIAMETRO TUBERIA | | *DIAMETRO COMERCIAL | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alimt.de Biomasa | Tanque de alimentación | Biodigestor | 100mm | 4'' | 110mm | 4'' |
| Descarga de Biol | Biodigestor | Tanque de Descarga | 100mm | 4'' | 110mm | 4'' |
| Descarga de Lodos | Biodigestor | Lecho de Lodos | 100mm | 4'' | 110mm | 4'' |
| Circulación de Biogás | Biodigestor | Filtros | 50 mm | 2'' | 50 mm | 2'' |
| Recirculación De Biol | Tanque de descarga | Tanque de alimentación | 100mm | 4'' | 110mm | 4'' |

**Fuente: Elaboración Propia**

*SEGÚN NORMAS COVENIN

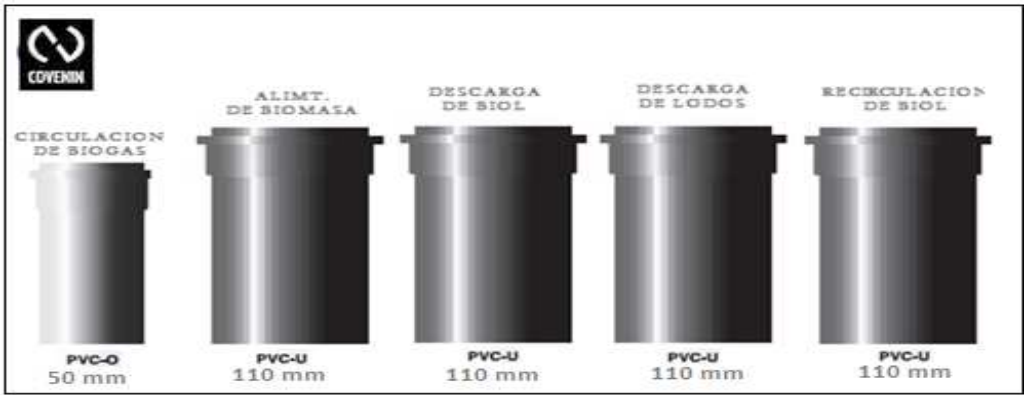



**Figura 4.89 Diámetro de tuberías PVC según COVENIN**

Para la tubería de descarga de biogás se deben disponer válvulas de bola al principio y al final de la línea, junto con dos manómetros (marca Groth referencia 8170 y panel de referencia 8130) en las mismas posiciones. Adicionalmente, instalar, a la salida de la cubierta del digestor, un sensor de temperatura (termocupla tipo K con amplificador de voltaje), un sensor de presión (marca AllSensors referencia 1 PSI-G-4V), así como un sensor de caudal a la entrada del gasómetro (marca Hoffer referencia HO). Se incluye también una trampa de llama y un quemador de exceso de gas, este último tiene una línea para pilotaje que puede ser alimentada con combustible convencional o con el mismo biogás. El diseño se complementa con un instrumento que registra la presión de gas a la salida del gasómetro (marca Gast referencia R4), la cual debe oscilar entre los 25,4 y los 50,8 centímetros de agua, dependiendo del caudal de salida de biogás.

**Figura 4.90 Válvulas de bola para tuberías PVC de 2”**

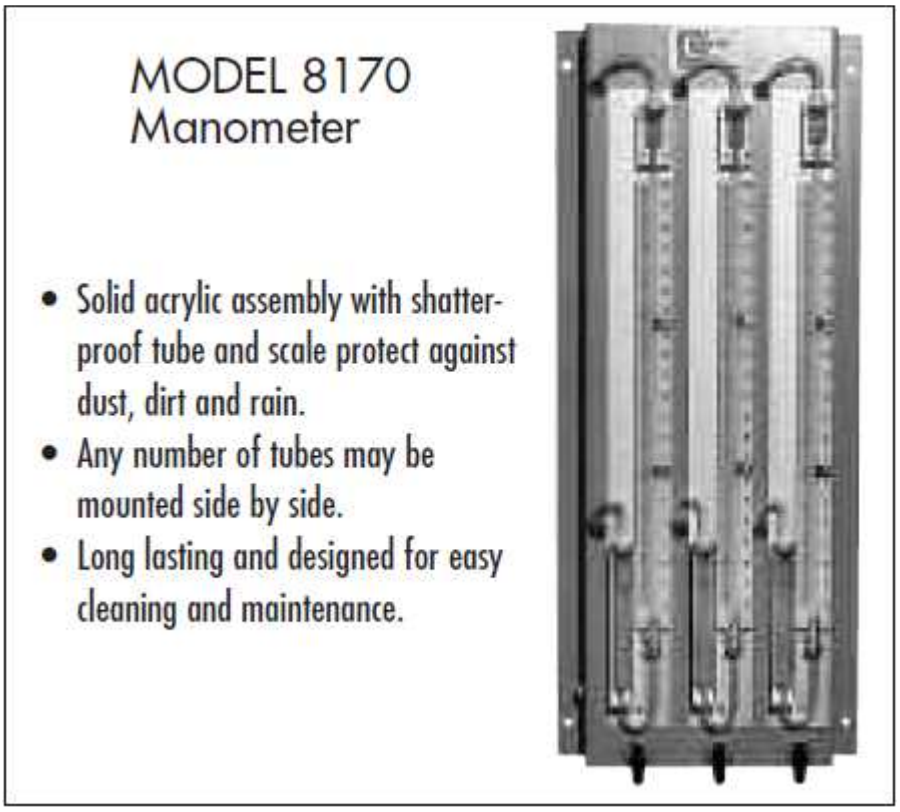



**Figura 4.91 Manómetro Modelo 8170**

**Figura 4.92 Sensor de temperatura tipo termocupla**

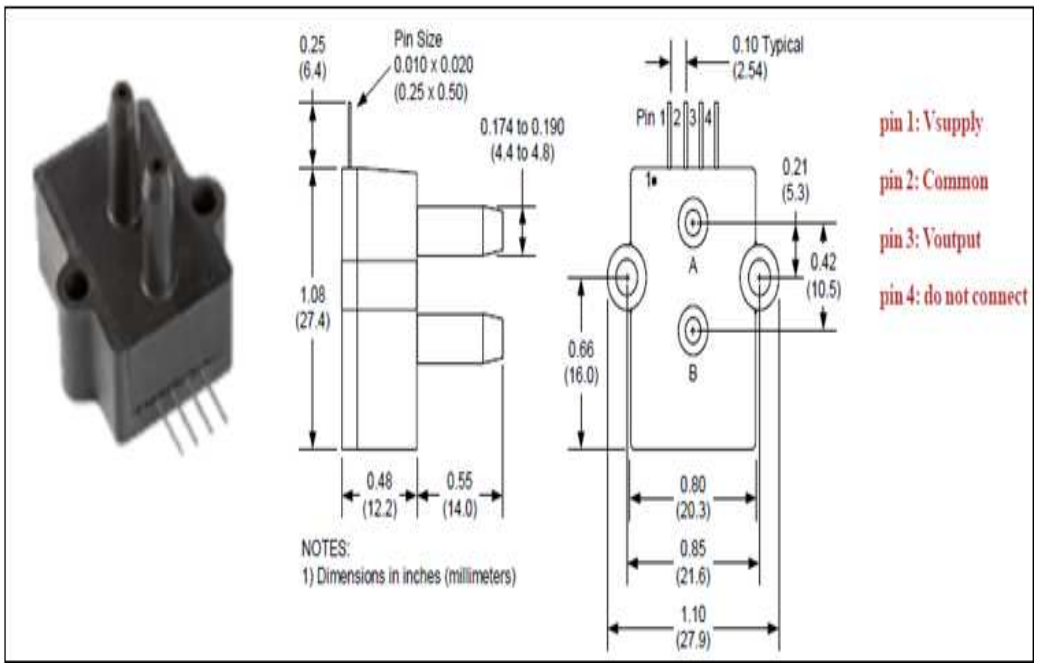



**Figura 4.93 Sensor de presión 1 PSI-G-4V marca AllSensors**

**Figura 4.94 Trampa de llama 8450 marca Groth**

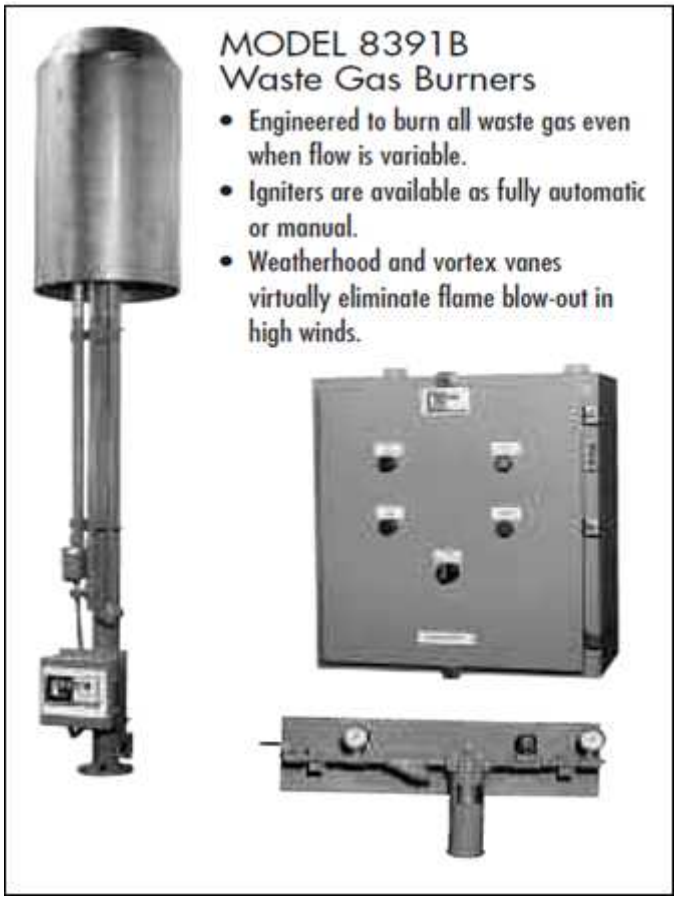



**Figura 4.95 Quemador de exceso de gas 8391B marca Groth**

#### 4.7.1.4. Filtros de limpieza biogás Biolimp Siloxa

Los filtros de limpieza BIOLIMP-Siloxa garantiza la reducción del vapor de agua, partículas, H2S y siloxanos hasta valores adecuados para su uso en la generación de electricidad o calor, ver anexo 1. Los equipos que conforman el modulo se encuentran dentro de una base formando un paquete tecnológico de fácil operación, mantenimiento e instalación. La Figura 4.96 presenta el diagrama de flujo de las operaciones básicas que en él se desarrollan.

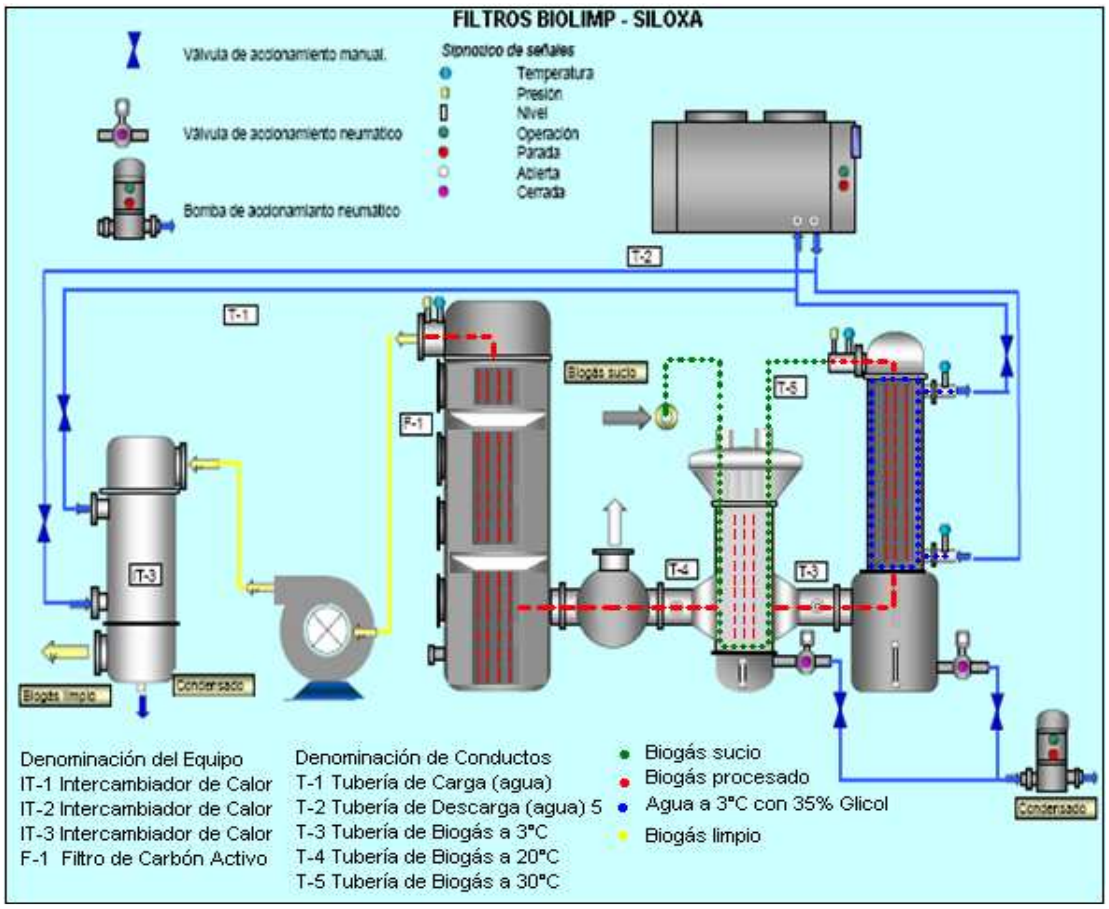



**Figura 4.96 Modulo de limpieza de Biogás Biolimp-Siloxa**

#### 4.7.1.4.1. Descripción de la operación de los equipos del modulo de limpieza

Al **recuperador (**intercambiador de superficie**)** del tipo tubo y coraza de flujo cruzado entra el biogás, procedente del vertedero, saturado en vapor de agua y con temperatura próxima a los 35ºC; pasa por el interior de los tubos en sentido descendente y ascendente mientras que por el lado de la coraza circula el biogás frio a 3 ºC garantizando el enfriamiento del biogás entrante y el calentamiento del biogás saliente del deshumidificador. El contacto del biogás con la superficie fría produce la condensación de la humedad. La corriente descendente garantiza el arrastre del condensado hacia la parte inferior del equipo. Este condensado se extrae del fondo

del equipo por medio de un sistema formado por: medidor de nivel, válvula neumática y bomba de diafragma.

Al **deshumidificador** (intercambiador de superficie) del tipo tubo y coraza entra el biogás procedente del recuperador con temperatura próxima a los 25 ºC, pasa por el interior de los tubos en sentido descendente mientras que por el lado de la coraza y, en sentido ascendente, circula agua fría a 3 ºC con un 35 % de glicol.

El contacto del biogás con la superficie fría produce el enfriamiento y la condensación de la humedad y con ello, la reducción de parte de los siloxanos. La corriente descendente del biogás garantiza el arrastre del condensado hacia la parte inferior del equipo.

La temperatura de salida del biogás de esta etapa se encuentra alrededor de los 2 a 5 ºC temperatura que permite reducir hasta en un 50 % la concentración de los siloxanos y hasta un 90 % el nivel de humedad.

El **depósito colector de condensados** tiene acoplado un sistema formado por bomba de membrana, medidor de nivel y válvula neumática (sistema de extracción de condensados). Cuando el nivel ha alcanzado la altura preestablecida en el tanque, simultáneamente, se abre la válvula y se inicia la extracción del condensado por operación de la bomba de membrana.

**La máquina de refrigeración.** Es la que garantiza el medio de enfriamiento (agua con glicol) a los intercambiadores de calor agua-biogás (deshumidificador y postenfriador). Es una enfriadora de agua que trabaja por el método de condensación por aire y posee una potencia frigorífica de arranque de 3 kW. Esta máquina, se encuentra acoplada los intercambiadores de calor y trabaja en circuito cerrado con los

mismos, por lo que no requiere aporte adicional de agua. La temperatura de trabajo se encuentra entre 0 a -3 ºC.

El biogás acondicionado procedente del recuperador pasa **al filtro de carbón activo.** Es un depósito fabricado en acero inoxidable y provisto en su interior de parrillas, estratégicamente situadas, que sirven de soporte al lecho de carbón activo.

El carbón activo se selecciona según compuesto a eliminar (H2S o Siloxano) y su cantidad de acuerdo a la concentración del mismo. En el filtro se eliminan la totalidad de los compuestos indeseables.

Éste posee cuatro bocas de hombre para la carga y descarga del carbón activo, así como para su inspección y limpieza. También con dos bocas de 250 mm para la entrada y salida del biogás a tratar.

La corriente de biogás entra por la parte inferior, pasa por las camas de carbón activo (dos), dónde se produce el intercambio de masa correspondiente, es decir, la absorción de los componentes indeseables (Siloxanos).

El biogás limpio sale por la parte superior del filtro, de aquí pasa a las soplantes que lo impulsan (aumenta su presión y la temperatura hasta los 70 ºC) hasta el postenfriado.

En **el postenfriador** (intercambiador de superficie) del tipo tubo y coraza. En este equipo el biogás procedente de la soplante, con temperatura próxima a los 70 ºC, pasa por el interior de los tubos en sentido descendente mientras que por el lado de la coraza y, en sentido ascendente, circula agua fría a 0 ºC con un 35 % de glicol.

El contacto del biogás con la superficie fría produce el enfriamiento y la condensación de la humedad remanente y, con ello la reducción de la humedad

relativa y de la temperatura del biogás. La corriente descendente del biogás garantiza el arrastre del condensado hacia la parte inferior del equipo.

**Figura 4.97 Filtros Biolimp-Siloxa**

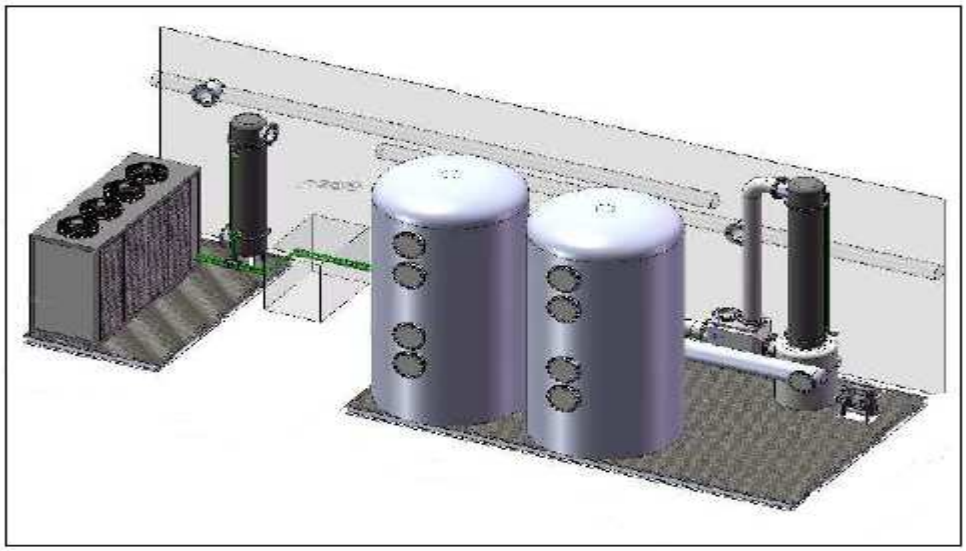


**Figura 4.98 Vista isométrica de los filtros Biolimp-Siloxa**

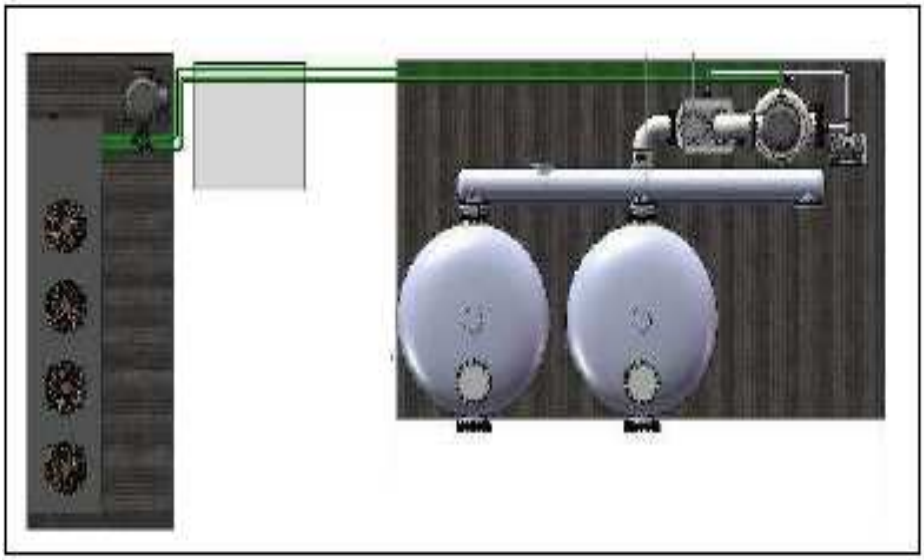


**Figura 4.99 Vista de planta de los filtros Biolimp-Siloxa**

#### 4.7.1.5. Gasómetro

La presión del biogás a la salida del biodigestor normalmente es muy baja, oscila entre 1 psi a 3.5 psi, por lo que es imposible alimentar directamente el motogenerador con esta presión de gas, ya que el mismo trabaja con una presión de entrada de biogás de 1atm o 14,7 psi. Para solventar este problema se requiere la implementación en la planta de un gasómetro, que se utilizara para aumentar la presión del biogás a la requerida por el motegenerador y al mismo tiempo almacenar el gas producido en los biodigestores, ver anexo 1.

El volumen del gasómetro depende de la producción diaria de biogás y la comprensibilidad del mismo, para efectos de diseño se asume que el biogás se comprime diez veces su volumen. Esta característica es muy importante ya que permite una reducción considerable del volumen del tanque de biogás lo que directamente se convierte en un ahorro de material para la construcción del mismo e indirectamente en ahorro de dinero.

De la tabla 4.22 se puede observar que el volumen diario de biogás producido por la planta será de 2056,77m³, con lo que el volumen del gasómetro lo obtenemos a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{Gasometro} = \frac{P_{Biogas_{Diaria}}}{K_c} = \frac{2056{,}77m^3}{10} = 205{,}67m^3$$

Aplicamos un factor de seguridad del 30% en la capacidad de almacenamiento del gasómetro, y el valor de seleccionamiento del mismo será:

$$V_{Seleccion_G} = 1{,}25 * 205{,}67\ m^3 = 257{,}08\ m^3$$

Entonces el gasómetro de la planta de biogás tendrá una capacidad de 257.08m³, a continuación buscamos en un catalogo un gasómetro que cumpla con esta condición.

**Tabla 4.36 Selección de Gasómetros SATTLER**

SATTLER the highTEX company — Gasómetro de doble membrana Sattler

**Tamaños Standard**

| Type | m³ | Ø m | h m |
|---|---|---|---|
| B9 110 | 100 | 6,05 | 4,54 |
| B9 112 | 170 | 7,26 | 5,44 |
| B9 114 | 270 | 8,47 | 6,35 |
| B9 116 | 400 | 9,68 | 7,26 |
| B9 118 | 570 | 10,89 | 8,17 |
| B9 120 | 780 | 12,10 | 9,07 |
| B9 122 | 1.040 | 13,31 | 9,98 |
| B9 124 | 1.350 | 14,51 | 10,89 |
| B9 126 | 1.720 | 15,72 | 11,79 |
| B9 128 | 2.150 | 16,93 | 12,70 |

**Fuente: SATTLER**

El gasómetro de doble membrana de SATTLER - B9114 está compuesto por una membrana exterior encargada de darle forma, así como por una membrana interior y una membrana de fondo que constituyen la zona efectiva de acumulación de gas. Un soplante de aire de apoyo en funcionamiento continuo transporta aire a los espacios vacíos manteniendo la presión constante sin depender así de la producción y toma de gas. La presión en los espacios vacíos cumple con la función de mantener la forma de la membrana exterior. Gracias a ello el gasómetro puede resistir todas las cargas externas. Al mismo tiempo esta presión ejerce un efecto sobre la membrana interior teniendo como resultado el suministro de gas a la red de distribución. La entrada y salida de gas están ubicadas en el fundamento de hormigón reparado en la obra. Las tres membranas están sujetas al fundamento mediante un anillo de anclaje. La válvula de seguridad protege al gasómetro de la sobrepresión de gas. La regulación de la presión se lleva a cabo a través de una válvula de presión de flujo de aire. Para medir el nivel del depósito se utilizan sistemas de medición por ultrasonido y por longitud.

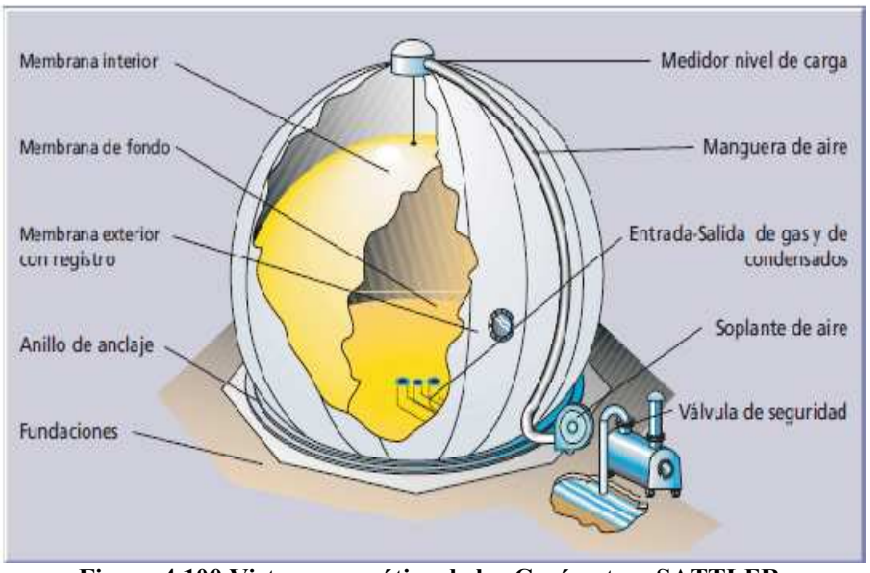



**Figura 4.100 Vista esquemática de los Gasómetros SATTLER**

**Figura 4.101 Gasómetros SATTLER**

#### 4.7.1.6. Bomba de descarga de biol

La descarga de biol desde el biodigestor hacia el tanque de descarga se llevara a cabo mediante la implementación de una bomba de agua capaz de elevar este líquido a una altura de 5m, donde se encuentra el tanque de descarga, ver anexos 6 y 9.

Para realizar una selección efectiva de la bomba, debemos determinar el NPSH disponible (altura neta positiva en la aspiración), dato importante ya que si este valor es menor que el NPSH requerido por la bomba puede ocurrir el fenómeno de cavitación, lo que ocasionaría un grave daño a los alavés del impulsor, ocasionando desgastes prematuros en la bomba.

$$\mathrm{NPSD_{Disponible}} = \frac{10\mathrm{P_a}}{\gamma} - \mathrm{H_a} - \Delta\mathrm{H_a} - \frac{10\mathrm{T_v}}{\gamma}$$

Donde:

$\frac{10P_a}{\gamma}$ = Presion Atmosferica o presión en el depósito de aspiración, en Kg/cm²

$H_a$ = Altura geométrica de aspiración, en m.

$\Delta H_a$ = Perdidas de carga en la aspiración, en m.

$T_v$ = Tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, en Kg/cm². Ver apéndice 2.

$\gamma$ = Peso especifico del líquido. Ver apéndice 2.

Para determinar las pérdidas de carga en la aspiración se emplea la ecuación de Veronesse-Datei, utilizadas especialmente en tuberías de PVC que tienen un numero de Reynolds comprendido entre $4\,X10^4\ y\ 10^6$.

$$h_a = 9{,}2 * 10^{-4} * \left(\frac{Q^{1,8}}{D^{4,8}}\right) * L$$

En donde:

- h: pérdida de carga o energía (m)
- Q: caudal ($m^3/s$)
- D: diámetro interno de la tubería (m)
- L: longitud de la tubería (m)

Antes de aplicar la ecuación de Veronesse-Datei, debemos determinar el número de Reynold para comprobar que este valor cumple con el rango para el cual es aplicable la ecuación anterior.

$$Re = D * v * {}^{\rho}/_{\mu}$$

$$\mathrm{Re} = 0{,}1 * 6{,}666 * \left(\frac{995{,}7}{0{,}708\mathrm{X}10^{-3}}\right) = 9{,}37561\ \mathrm{x}10^{5}$$

- ρ: densidad del agua (kg/m$^3$). Consultar apéndice 1.
- μ: viscosidad del agua (N·s/m2). Consultar apéndice 1.

Del resultado anterior se puede inferir que nuestro caso cumple con la exigencia de la ecuación de Veronesse-Datei, por lo que a continuación la aplicamos.

$$\mathrm{h_a} = 9{,}2 * \ 10^{-4} * \left(\frac{0{,}016666^{1{,}8}}{0{,}1^{4{,}8}}\right) * 20 \ = 0{,}731\mathrm{m}$$

Por lo que resolviendo la ecuación 1 de cálculo NPSH disponible queda:

$$\mathrm{NPSD_{Disponible}} = \frac{10{,}33}{0{,}9939} - 5 - \ 0{,}731 - \frac{0{,}573}{0{,}9939} \ = 4{,}085\mathrm{m}$$

A partir de ese valor podemos determinar las características Hidroeléctricas de la bomba de descarga de biol, entre las cuales tenemos:

**Tabla 4.37 Características Hidroeléctricas de la Bomba**

| | |
|---|---|
| Tensión Nominal | 240V- 480V |
| Temperatura del L | (30-45)°C |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Caudal | 60 m³/h |
| S. Transv de la tubería | 0,025m² |
| Altura Manométrica | 5m |
| NPSH disponible | 4,09m |

**Fuente: Elaboración Propia**

La bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex trabaja a 60 Hz/1150rpm y a una tensión nominal de 240 V, además la misma tiene un consumos de 1,8 hp a factor de potencia de 0.8, y un caudal de 60 m³/h utilizando una tubería de PVC de 2" y una altura manométrica de 5m. El NPSH requerido es de 1,3m menor al NPSH disponible 4,09m, con lo que se asegura que no se presentaran inconvenientes por causa de la cavitación en el interior de la bomba, lo que significa que la bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex cumple a cabalidad las especificaciones contenidas en el anexo C1.

Esta bomba puede trabajar en condiciones extremas de temperaturas, hasta 160 °F así mismo cuenta con una chaqueta de agua para enfriamiento y una mayor capacidad de aceite para mantener la temperatura de trabajo.

**Figura 4.102 Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

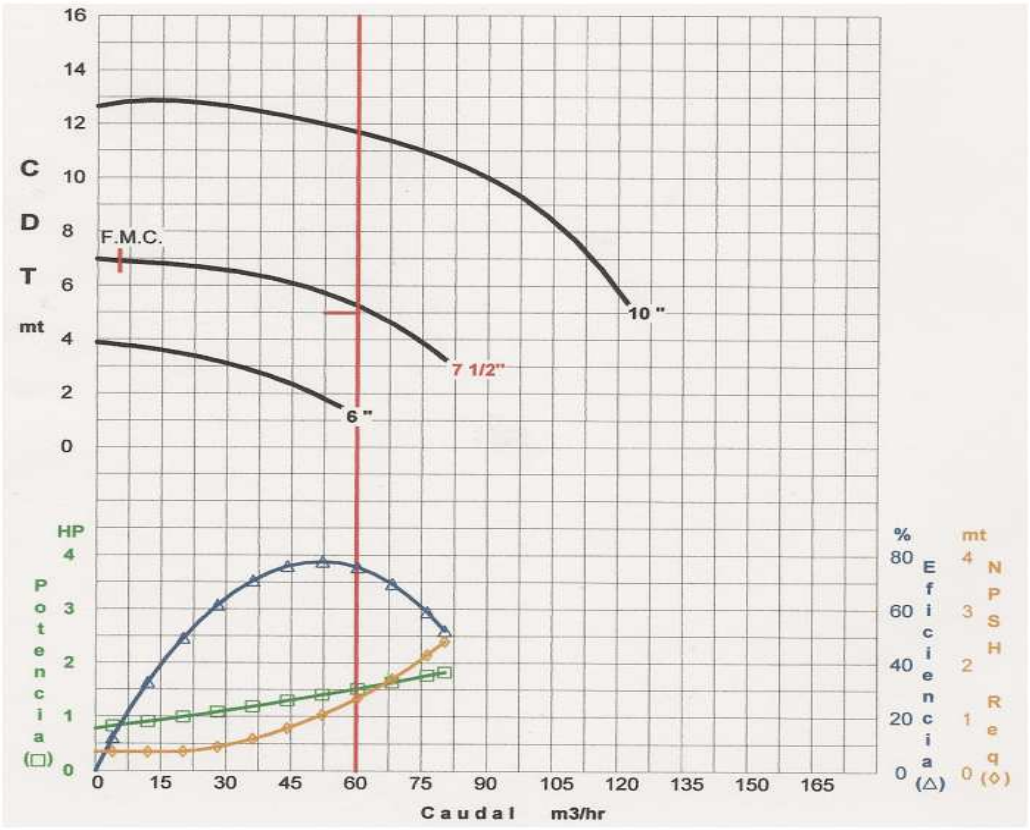



**Figura 4.103 Graficas de interés de Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

**Tabla 4.38 Características Hidroeléctricas de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

DURCOMEX — Selección de Bombas Centrífugas ANSI Durcomex — SENTINEL

| Datos de la Bomba Seleccionada: | | Datos de Operacion: | |
|---|---|---|---|
| Tamaño | : 2L 4 X 3 - 10H | RPM | : 1150 |
| Diam. Imp. | : 7 1/2" in | Diam. Imp. | : 7 1/2" in |
| Frecuencia | : 60 Hz | Caudal | : 60 m3/hr |
| RPM | : 1150 | CDT | : 5 mt |
| Curva No | : D62G606A | Potencia | : 1.5 HP |
| F.M.C. | : 5.2 m3/hr | Pot. Max | : 1.8 HP |
| Caudal Req: | 60.0 m3/hr | Eficiencia | : 75.8 % |
| CDT req. | : 5.0 mt | NPSHr | : 1.3 mt |
| liquido | : 160 °F | CDT Max | : 7.0 mt |

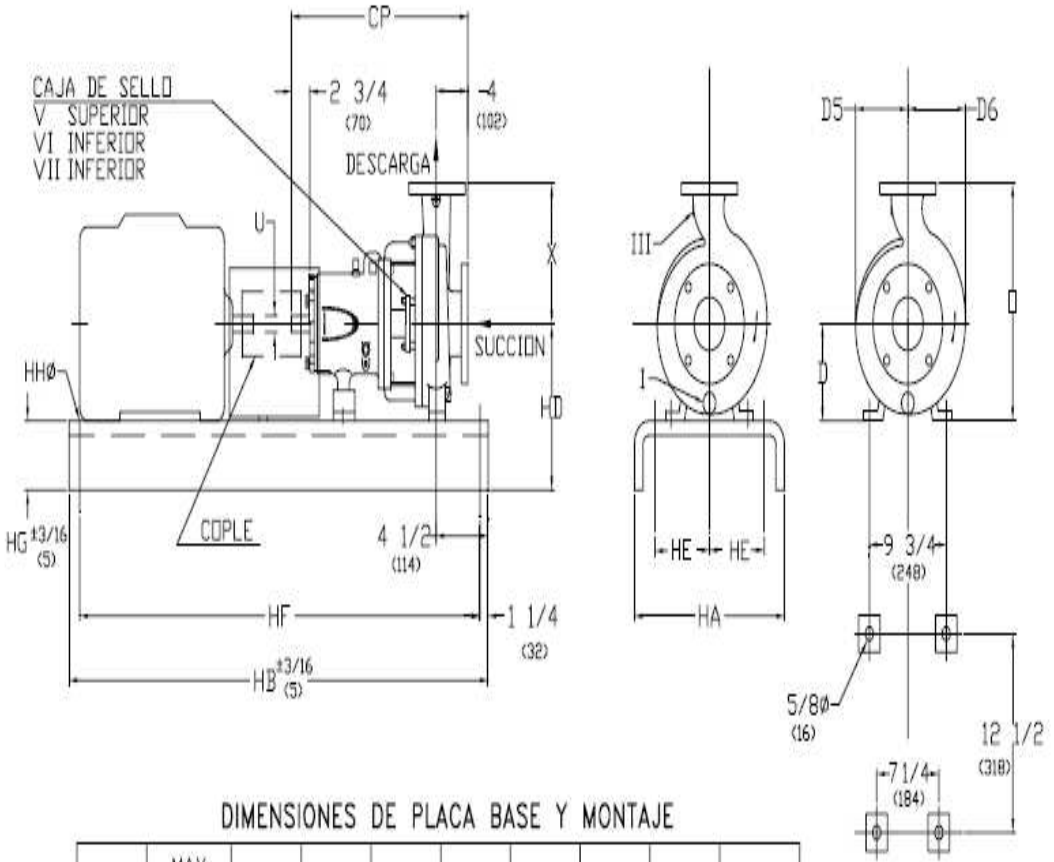
**Fuente: Durcomex**

IMBO

DURCOMEX

BOMBA DE PROCESO ANSI/ASME TIPO 2L 4 X 3 - 10H

| MODELO (SUCC. X DESC. - DIA. MAX. IMP.) | PESO BOMBA LBS (KG) | CP | D | D5 | D6 | D | U | | X |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | FLECHA | CUÑERO | |
| 2L 4 X 3 - 10H | 250 (113) | 23 1/2 (597) | 10 (254) | 7 1/2 (191) | 8 3/8 (213) | 22 1/2 (572) | 1 1/8 (29) | 1/4 x 1/8 (6 x 3) | 12 1/2 (318) |




DIMENSIONES DE PLACA BASE Y MONTAJE

| BASE | MAX ARMAZON MOTOR | HA | HB | HD | HE | HF | HG (NOTA 3) | HHØ | PESO lbs (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 245 | 184T | 15 (381) | 45 (1143) | 13 3/4 (349) | 4 1/2 (114) | 42 1/2 (1080) | 3 3/4 (95) | 3/4 (19) | 129 (59) |

DIMENSIONES DE MONTAJE BOMBA SOLA

**Figura 4.104 Dimensiones de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

#### 4.7.1.7. Bomba de descarga de lodos

El proceso de descarga de lodos desde el biodigestor hacia el lecho de secado se hará utilizando una bomba para vaciado de desechos residuales marca Flygt 3068, sumergible, conectada a un motor jaula de ardilla del tipo Flyght 1-3-10-2BZ, 240/480 voltios, 60 Hz, 2,3 hp y 1.800 r.p.m. La curva de acople entre el sistema y la bomba da como resultado una cabeza de 5,41 m y un caudal de 78 gpm. La biomasa procesada se conducirá hacia el Lecho de Secado por una tubería de 110mm de diámetro, ver tabla 4.35, cuya configuración se muestra en el anexo 5. La bomba se escoge considerando que ofrece características especiales para el manejo de mezclas con un cierto contenido de fibra y materiales sólidos, gracias a que posee un rotor con forma de S, que facilita la succión de los mismos; además cuenta con un embrague especial que permite desconectar el motor cuando algún objeto bloquea el rotor. Otra ventaja muy importante de este tipo de bombas es que posee un aparejo que permite desconectarla del tubo y sacarla para mantenimientos sin que el operador requiera entrar al tanque de recolección. Cabe anotar que el diseño del tanque del biodigestor está provisto de dos fosas especiales para colocar las bombas de descarga de lodos, ver anexo 9, lo que garantiza que esta se mantenga sumergida evitando la aspiración de aire. Es importante mencionar que la bomba estará en operación solamente cuando el digestor está en proceso de descarga, manejando un caudal de aproximadamente 18 m3/hora.

Cada biodigestor contara con dos bombas de descarga a cada una de sus lados como se puede apreciar en el anexo 6 esto quiere decir que la planta de biogás contara con cuatro bombas de este modelo para la extracción del material procesado dentro del biodigestor.

A continuación se muestran las características más representativas de la bomba para la descarga de lodos FLYGHT 3068

- Aplicaciones: Las aplicaciones típicas para esta bomba incluyen instalaciones de aguas pluviales, plantas de tratamiento de aguas residuales, desagües, regadíos, acuicultura y atracciones de agua con sólidos.

- Equipo de control: Esta bomba incorpora sensores de temperatura en sus bobinados de estator y en los rodamientos principales. En caso de penetrar líquido en el alojamiento del estator de la bomba, el sensor interruptor de detección de agua parará la bomba.

- Protección contra la corrosión: Para aplicaciones en ambientes corrosivos se pueden equipar estas bombas con pintura epoxi así como un eje e impulsor en acero inoxidable.

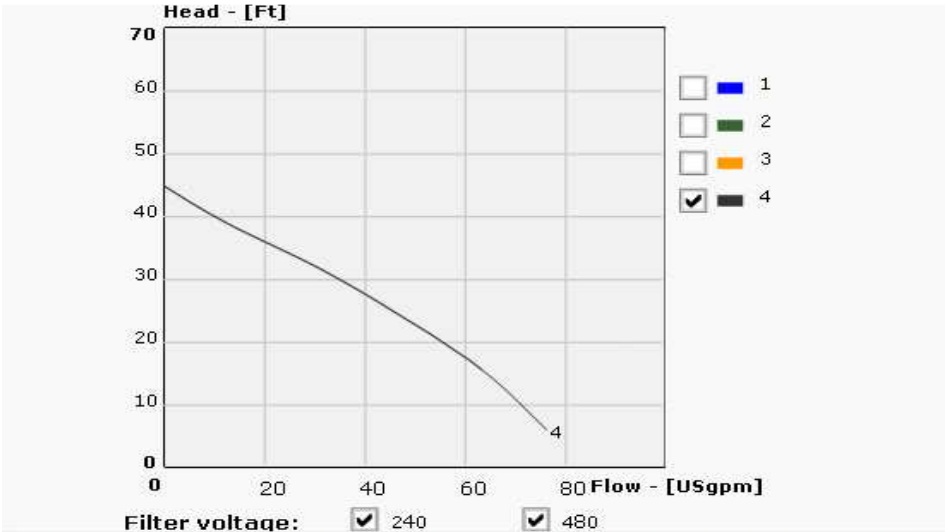
- Motor: Motor de inducción tipo jaula de ardilla, de alto rendimiento, diseñado para aplicaciones sumergibles y fabricados por FLYGT.

- Refrigeración: Sistema de refrigeración altamente eficaz que emplea el líquido bombeado como refrigerante.

- Rodamientos: Diseñados con un cojinete de rodillos y uno o dos rodamientos de bola de contacto angular. Este diseño evita la penetración de agua a través de los rodamientos en caso de fugas.

- Cámara de aceite: Además de lubrificar las juntas, la cámara de aceite dispersa el calor del motor y rodamientos. Asimismo proporciona seguridad adicional contra la penetración de líquidos.

**Figura 4.105 Bomba Flyght 3068**




| N | Drive | Imp. Code. | Imp. Diam. [mm] | Volute Outlet [inch] | Throughlet [inch] | Power [hp] | Poles | Ø | Volt. | Motor Conn | Motor ID |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 3068 | 285 | 110 | 1.5 | 1 | 2.3 | 2 | 1 | 240* | - | 13-10-2BZ |

* Dual Voltage Stator (240/480)

**Figura 4.106 Características Hidroeléctricas de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

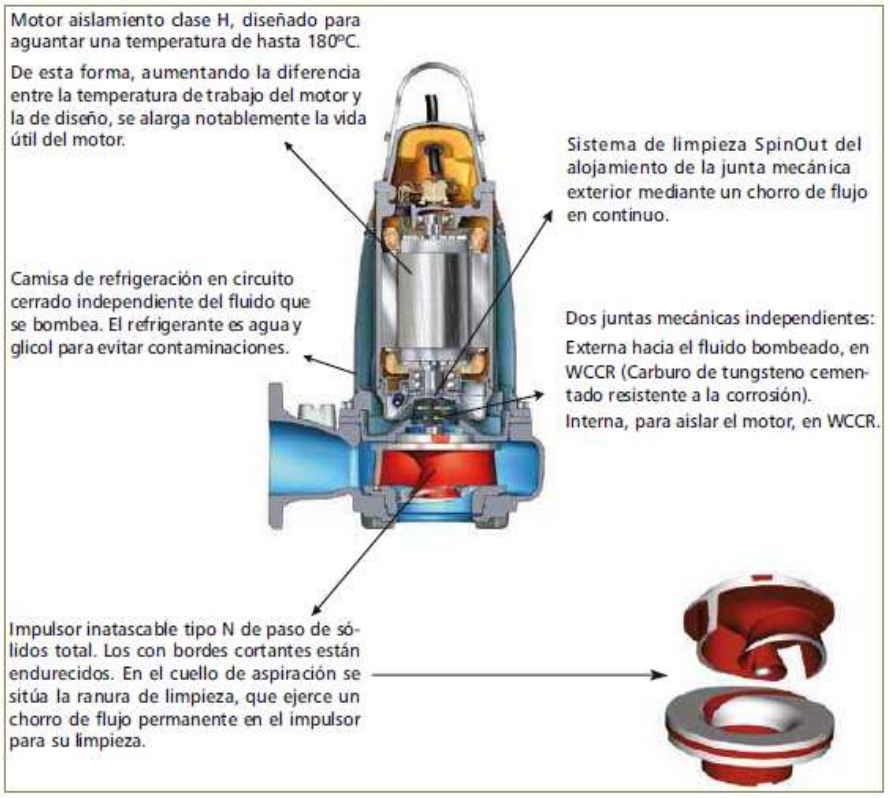



**Figura 4.107 Características Constructivas de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

ITT
Water & Wastewater

**Pump Description**

**General Information** | Issued: 1/09 | Supersedes: 4/08

**Typical Installations**

CT = Non-clog impeller or "N" technology impeller in volute --- Stationary, vertical dry pit installation or
FT base stand, dry pit submersible wastewater pump.
NT

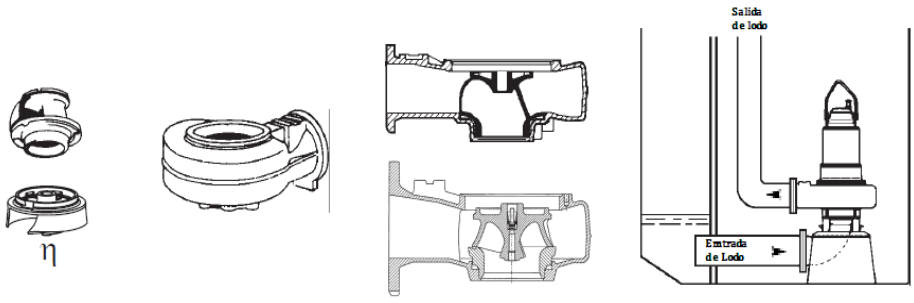



**Figura 4.108 Instalación típica de la Bomba 2L4 X 3 –10H Durcomex**

# CAPITULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se describen las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación, basadas en los resultados obtenidos, con referencia al tema de *Energías Alternativas*, específicamente la *generación de potencia a través del uso de la biomasa en zonas agropecuarias de nuestro país*, puntualmente en el estado Guárico. Esta investigación tuvo como principal logro, determinar el potencial de generación de energía eléctrica que se encuentra en el estado, además de dimensionar las estructuras básicas que conforman una planta de generación de potencia con el uso de biogás.

## 5.1. Conclusiones.

En el presente trabajo de investigación, se centro en la generación de potencia a través de la producción de Biogás, procedente de desechos agropecuarios, denominados como: heces de ganado bovino. A continuación se dan respuesta a los objetivos específicos desarrollados en la presente investigación:

### A. Estudio Del Potencial De Biomasa.

Se estableció el estudio de la biomasa disponible como material de carga. Para ello fue necesario establecer algunas pruebas de laboratorio, que permitieron determinar la cantidad de biogás disponible en las muestras. En lo que se refiere a este proyecto de investigación, se usaron muestras de análisis realizados en diferentes zonas del mundo, tales como: España, Alemania, Australia y otros. Se tomo en cuenta estos resultados comparativos, ya que el régimen alimenticio de estos animales herbívoros; es estándar.

Estos estudios dieron como resultado la estimación de la cantidad de *estiércol producido, la cantidad de biogás generado y cantidad de energía*; según las proporciones del peso y tipo de animal conocidos.

**B. Evaluación De Los Diferentes Tipos De Biodigestores Existentes En El Mercado, Así Como Parámetros A Considerar Para Establecer Los Criterios De Diseño.**

Se establecen los criterios de diseño de la planta de generación de potencia, previo conocimiento de los diferentes tipos de Biodigestores existentes en el mercado. En este apartado se considero, la conceptualización del mismo, además se establece en forma generalizada, el modo de funcionamiento de dicho sistema. En esta fase se estableció, el diseño de la estructura física de la planta; dando como resultado lo siguiente:

- Almacenamiento de Biogás: Cúpula tipo móvil.
- Forma Geométrica: Cámara Rectangular.
- Materiales de Construcción: Geomembrana.
- Posición respecto a la superficie: Subterráneo.

Se escoge este modelo ya que cumple los parámetros establecidos en los cálculos teóricos y prácticos, además de concordar con la tecnología requerida para tales fines.

**C. Dimensionar Las Plantas De Biogás Y Sus Estructuras.**

Se realizó una propuesta basada en la cantidad de biomasa disponible en la zona caso estudio, siendo esta condición la razón fundamental para asegurar la generación de potencia como forma de energía alternativa del sistema eléctrico.

En función de la cantidad de Biomasa disponible se plantearon, una serie de criterios para el cálculo y dimensionamiento de estructuras físicas encargadas del tratamiento de afluentes tales como: Tanques de Alimentación y Digestor. Otras estructuras físicas como; Tanque de descarga y Lecho de Secado de Lodos, las cuales se encargan del tratamiento de los efluentes. Además, de la selección del sistema de tuberías y equipos que se encargan de la conducción, tratamiento y almacenamiento del Biogás producido.

**D. Diseñar La Planta De Generación De Potencia A Través Del Software Biodigestor©, A Fin De Caracterizar El Diseño De La Planta.**

En función de conceptualizar la planta de Biogas, se utilizó, como herramienta de precisión, el software Biodigestor©. Previo ajuste de los parámetros de las características de la biomasa a utilizar, proporciono los siguientes resultados:

- Dimensionamiento de los tanques de Carga, Descarga y Digestión, facilitando medidas de volumen, base y altura de los mismos. Además, de Respectivos planos, con vistas que permitieron la visualización de las mencionadas estructuras físicas, logrando, la ubicación de equipos internos y externos tales como: Bombas succión, Agitadores, Mezcladores y Tuberías.

- Datos referente al Cálculo de: Producción de biogás y energía, equivalencias CO2, producción específica biogás (Nm3), producción especifica CH4 (Nm3), equivalencias energéticas biogás, producción de fertilizante orgánico. Lo cual permitió entre otras cosas, seleccionar el equipo de generación de energía eléctrica, estimar la cantidad de gases de efecto invernaderos, como el $CO_2$; y de esta manera estimar el impacto de la planta sobre el medio ambiente.

Además de la cantidad de, producción de bio-fertilizantes, procedentes de la transformación de la biomasa original.

**E. Dimensionar Y Seleccionar El Generador De Potencia Eléctrica.**

Por medio de Ecuaciones matemáticas, se procedió a hacer un cálculo teórico de la potencia instalada, de esta manera se comprobó el valor proporcionado por el software Biodigestor©. Esto permitió, hacer la selección del sistema de moto-generación dentro de una gama de equipos existentes en el mercado, nacional e internacional.

Con la selección de la maquina se obtuvo, las características de trabajo de la misma. Esto, facilitó la construcción del modelo en matlab® simulink, tanto de la máquina de combustión de Ciclo Otto, como de la Máquina Sincrónica. Con el fin de verificar, el funcionamiento de la generación de potencia efectiva, evaluando variables de interés como lo son: Tensión, Corriente, Potencia, Factor de Potencia, Torque y las rpm de la moto-generador.

## 5.2. Recomendaciones

1. Para complementar el estudio se recomienda hacer una evaluación del cálculo de las estructuras físicas propuestas como partes de la planta.
2. Se recomienda realizar el diseño de las líneas de Afluentes (entradas); efluentes (salidas) y de las líneas de transporte de biogás.
3. Se recomienda como trabajo de campo, aplicar los análisis físico-químicos, a la biomasa, considerada como material de carga; cuando se decida implementar el modelo propuesto.
4. Se recomienda la elaboración de un protocolo de arranque y parada, para el modelo de la planta propuesta en la presente investigación, con la finalidad de

reducir costos y aumentar el nivel de confiabilidad y disponibilidad de las instalaciones.

5. Se recomienda la elaboración de un manual de seguridad industrial según las normas ISO-9000, asegurando de esta manera, el buen funcionamiento del proceso de la planta.
6. Se sugiere, el diseño de un cuarto de máquinas, donde se establezca el panel de control automático de toda la planta.
7. Para el caso de establecer el lugar, para implementar este proyecto, se recomienda hacer el estudio de aislamiento eléctrico y protecciones contra rayo o sobretensiones atmosféricas.
8. Es necesario establecer la conexión, del nuevo sistema de generación a la red de distribución de la zona, por ello se recomienda el estudio del sistema de interconexión de la planta con la red eléctrica nacional.
9. Como agente interventor en el medio ambiente, es imprescindible hacer un estudio de impacto ambiental en la zona donde se construya la planta propuesta; con la finalidad de cumplir con las normas del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA).

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**[1]** **López, C José A, León, M. Vicente M. (2006*). "Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía"***. Primera edición, Dirección General de Planificación y Análisis de Mercados. Andalucía, España.

**[2]** ***Biogás Nord España S.L. "Su futuro con el biogás".*** [Online]. www.biogas-nord.com.

**[3]** **Herrero, Jaime Martí. (2008).** ***"Biodigestores familiares, guía de diseño manual de instalación".*** Primera edición, Programa de desarrollo agropecuario (PROAGRO), Bolivia.

**[4]** **Savran, L. Eduardo V. (2005).** ***"Una solución energético – ambiental para reducción de contaminantes agropecuarios, como contribución al manejo integrado de la cuenca Zaza".*** Tesis presentada para optar al título académico de Máster en Gestión Ambiental y Protección de los Recursos Naturales. Universidad Camilo Cienfuegos. Matanzas.

**[5]** **FIRCO.** ***"El aprovechamiento de biogás en la generación de energía, dentro del sector agropecuario".*** [Online]. http://www.firco.gob.mx/.

**[6]** **Biogás Región.** Boletín informativo nº 2. [Online]. www.biogasregions.org

**[7]** **Rojas Z. Juan C. (2006).** ***"Plantas de digestión anaeróbica y producción de biogás en el ámbito domestico, rural, o en general de micro aplicaciones con énfasis para comunidades altas andinas".*** 1er Seminario Internacional Sobre el Uso de Energías Renovables. Caracas, Venezuela.

**[8]** **Rodríguez R, Julio C. (2004).** ***"Resultados experimentales sobre la producción de biogás a través de la bora y el estiércol de ganado".*** Trabajo de investigación, Universidad de Oriente. Estado Bolívar, Venezuela.

**[9]** **Posso, R. Fausto R. (2004).** ***"Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: sistema energético basado en energías alternativas".*** Trabajo de Investigación, Universidad de Los Andes. Táchira, Venezuela.

**[10]** **Longatt, G. Francisco M. (2007).** ***"Introducción a los sistemas de transmisión y generación".*** Trabajo de investigación, Universidad Nacional Experimental Politécnica de Fuerza Armada. Maracay, Venezuela.

**[11]** **Vera, G. Antonio A. (1996).** ***"Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales".*** Trabajo de investigación, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora", San Carlos de Cojedes, Venezuela.

**[12]** **Patiño, V. Wilfrido. (2008).** ***"Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final de Navarro, bajo los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto 2008".*** Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Santiago de Cali, Santiago de Cali, Colombia.

**[13]** **Hilbert, Jorge A. (2006).** ***"Manual para la producción de biogás".*** Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. Castelar**,** Buenos Aires- Argentina.

**[14]** **Carrillo, Leonor C. (2003).** ***"Microbiología agrícola".*** Trabajo de investigación en Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Salta, Argentina.

**[15]** **Bravo D. Francisco Javier. (2002).** ***"La integración económica y territorial de las energías renovables y los sistemas de información".*** Trabajo especial de grado para optar al título de Doctor. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

**[16]** **Anguita R (2003).** ***"Revista Ambiental".*** *Edición N*º 28. Ministerio de medio ambiente. España. [Online]. www.mma.es/publicacion/ambiental.

**[17]** **Grupo de trabajo de planeación energética CONCYTEG. (2003).** ***"Biogás y Biometanacion"****.* Trabajo de Investigación, Guanajuato, México.

**[18]** **Pendones, B. Rafael. (2003).** ***"Energía de la Biomasa"***, I Jornadas Técnicas de Ciencias Ambientales. Madrid, España.

**[19]** **Wereko, B. Charles Y; Hagan, E. Chichester, B. (1996).** ***"Biomass Conversion and Technology"****.* Segunda edición, Editorial John Wiley & Sons.

**[20]** **Aguilar D, Oriany de Jesús; Álvarez R, David F. (2000). "*Paseo virtual por el interior de un motor de combustión interna en funcionamiento".*** Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero en Sistemas. Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.

**[21]** **Belli Luís A. (2006).** "***El motor de combustión Interna".*** Trabajo de investigación en el área de postgrado, UNEFA, Puerto. Cabello, Venezuela.

**[22]** **Zemansky, Mark; Dittman, Richard. (1981).** ***"Calor y termodinámica"*** 6ta edición, McGraw Hill, México.

**[23]** **Fraile M, Jesús (2003).** ***"Maquinas Eléctricas".*** 5ta edición, McGraw Hill Interamericana, España.

**[24]** **Fumagalli Luigi V. (2005).** ***"Modelación y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia".*** Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

**[25]** *Blanca (Esta pertenece al capitulo III)*

**[26]** **APHA-AWWWA-WPCF. (1975).** ***"Standard Methods for the examination of water and wastewater".*** 14th Edition.

**[27]** **Glynn Henry L; Heinke Gary W. (1999)** ***"Ingeniería Ambiental".*** 2da Edicion, *Prentice Hall*, Mexico.

**[28]** **Rivas Mijares, G. (1978).** ***"Tratamiento de Aguas Residuales"***. 2da Edición. Caracas, Venezuela.

**[29]** **TAYLHARDAT, L. (2005).** ***"Biodigestores. Su utilización como estructura alternas de saneamiento y como fuente alterna de energía accesoria"*** Revista Porciven. Año 12, Nro 205.

**[30]** **Romero, J. (2000).** ***"Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Colombia"***. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

**[31]** **Moncayo, R. Gabriel. (2008).** ***"Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás"***. Primera edición, Editorial Aqualimpia Beratende Ingenieure.

**[32]** ***Fundación Hábitat. (2003). "Biodigestores una alternativa a la autosuficiencia energética y biofertilizantes.*** Editorial Qimbaya, Quindío, Colombia.

**[33]** **Guevara V, Antonio. (1996).** ***"Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales"***. Trabajo de Investigación. Centro Panamericano de Investigación Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima, Perú.

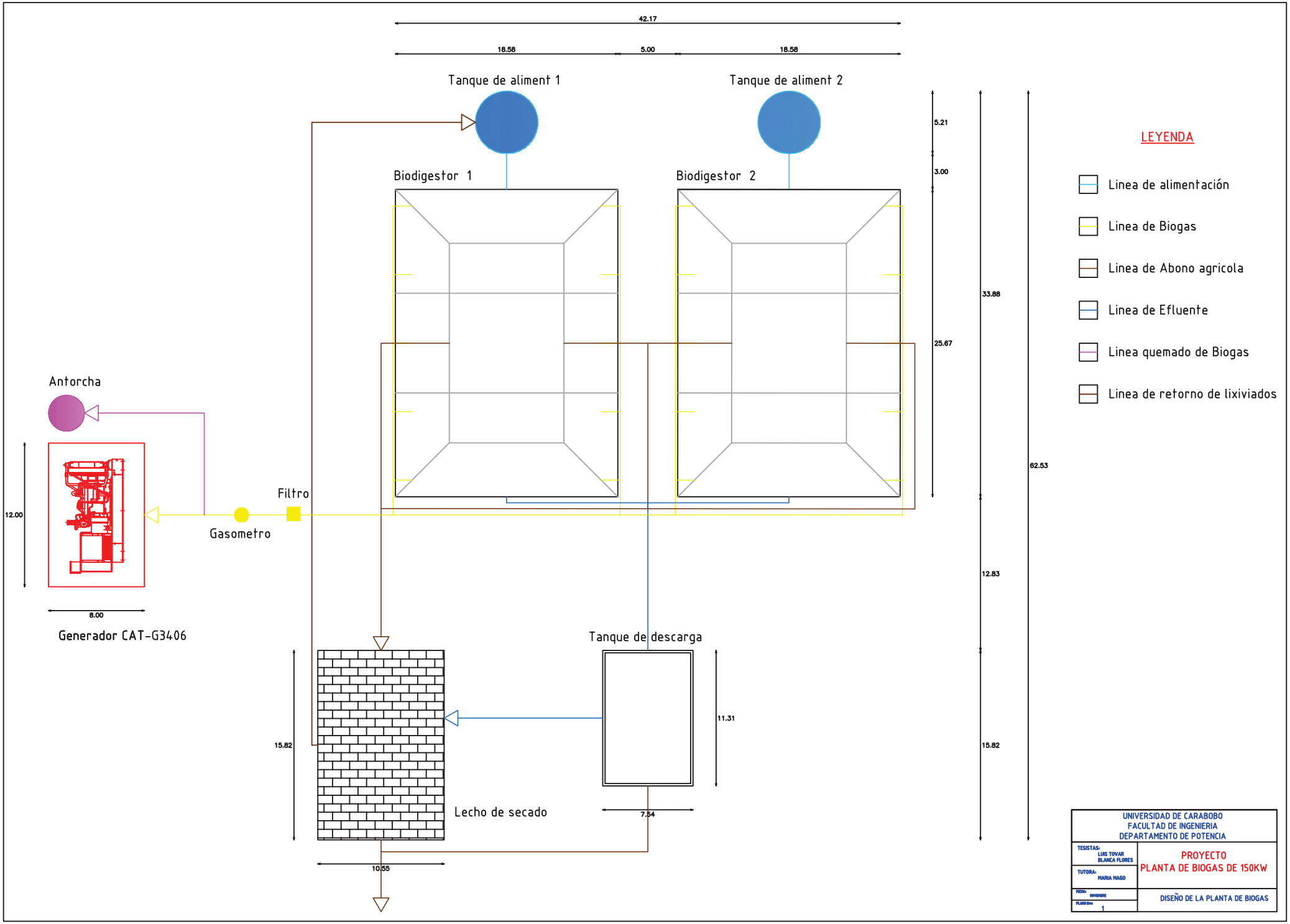
**[34]** **Revah S. (1996).** ***"Generalidades sobre procesos de purificación biológica en Aire/Gas"***. Trabajo de investigación; Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, México.

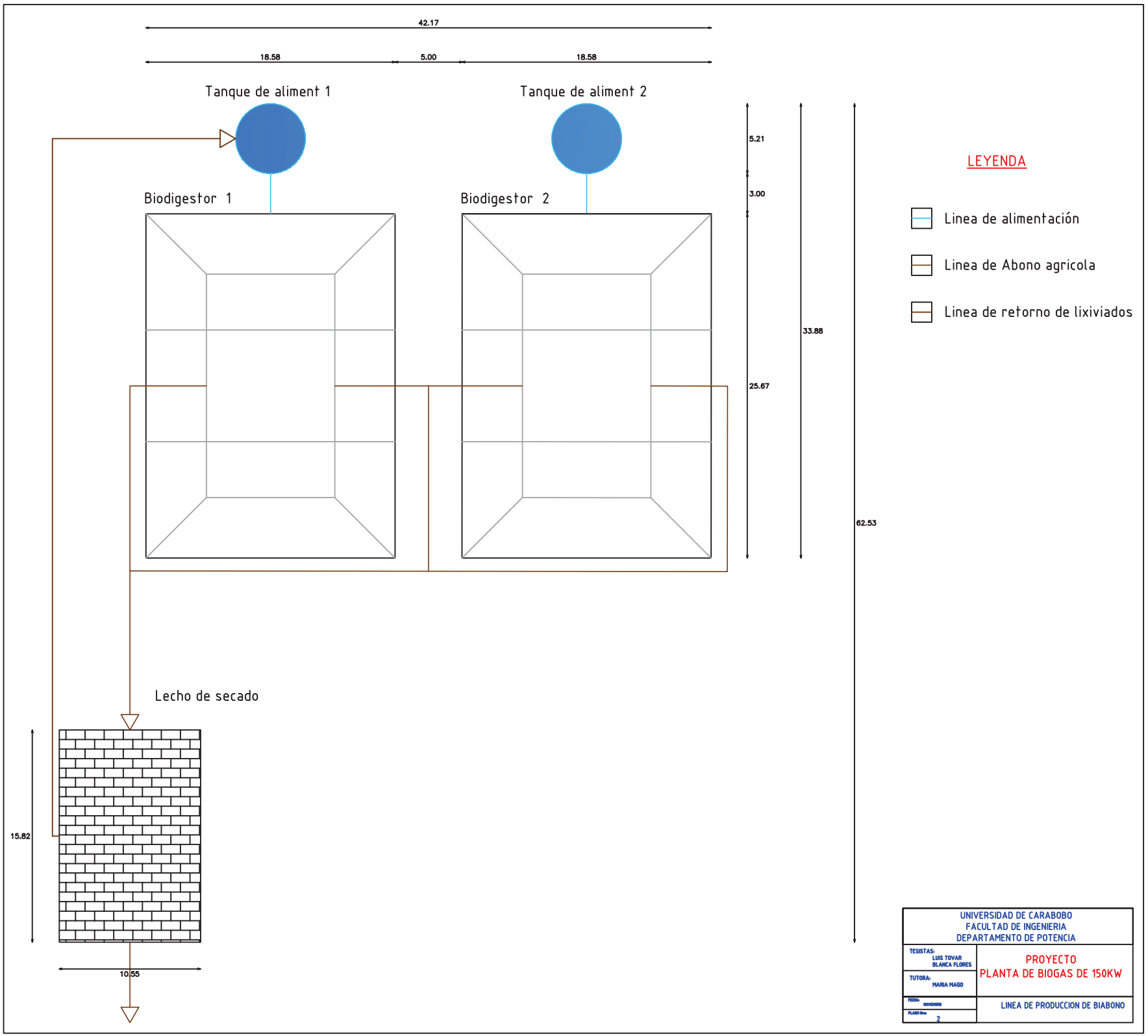
**[35]** **The mathworks™. "**SimPowerSystems". **[Online]: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/ref/synchronousmachine.html**

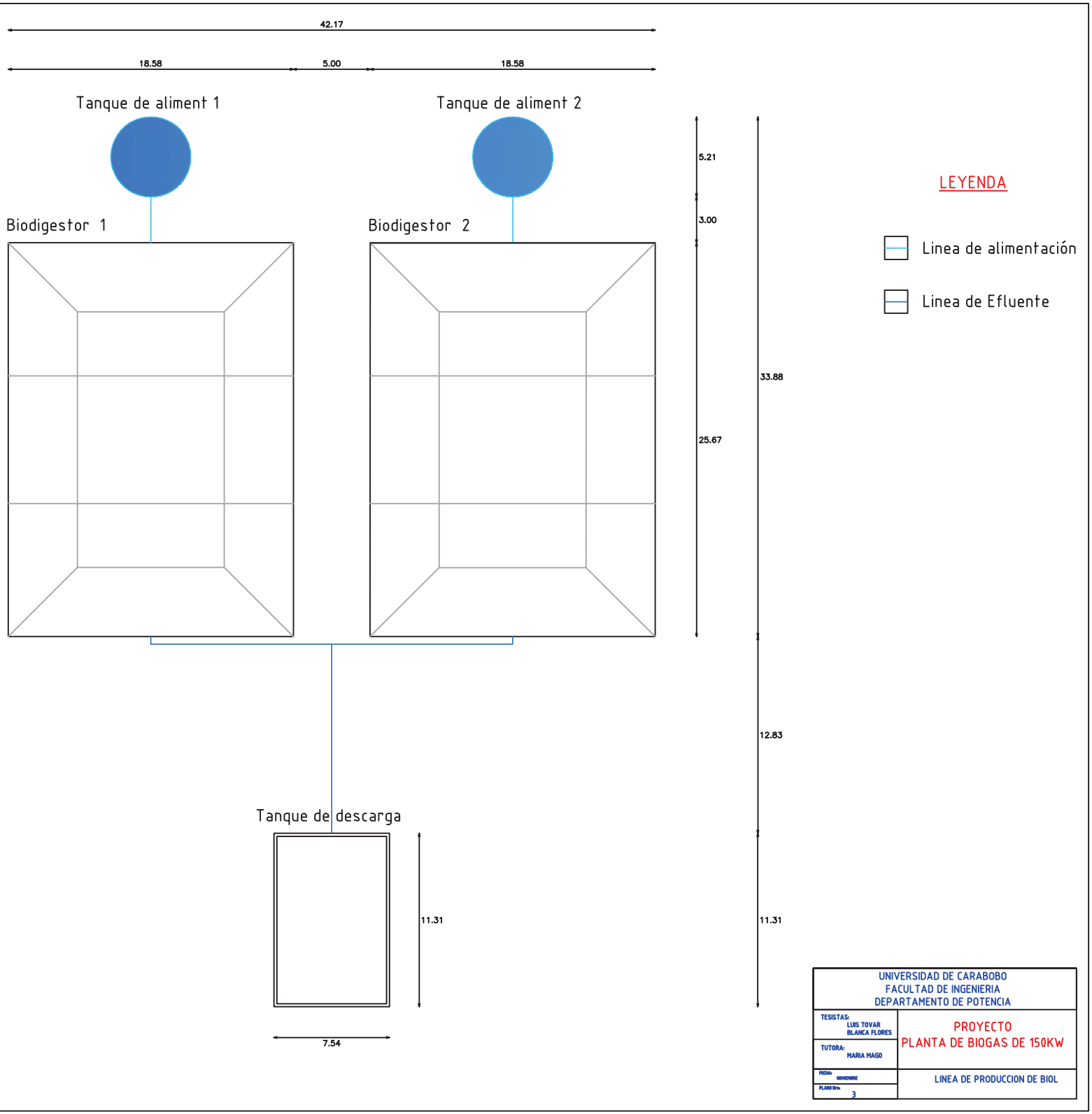
# ANEXOS

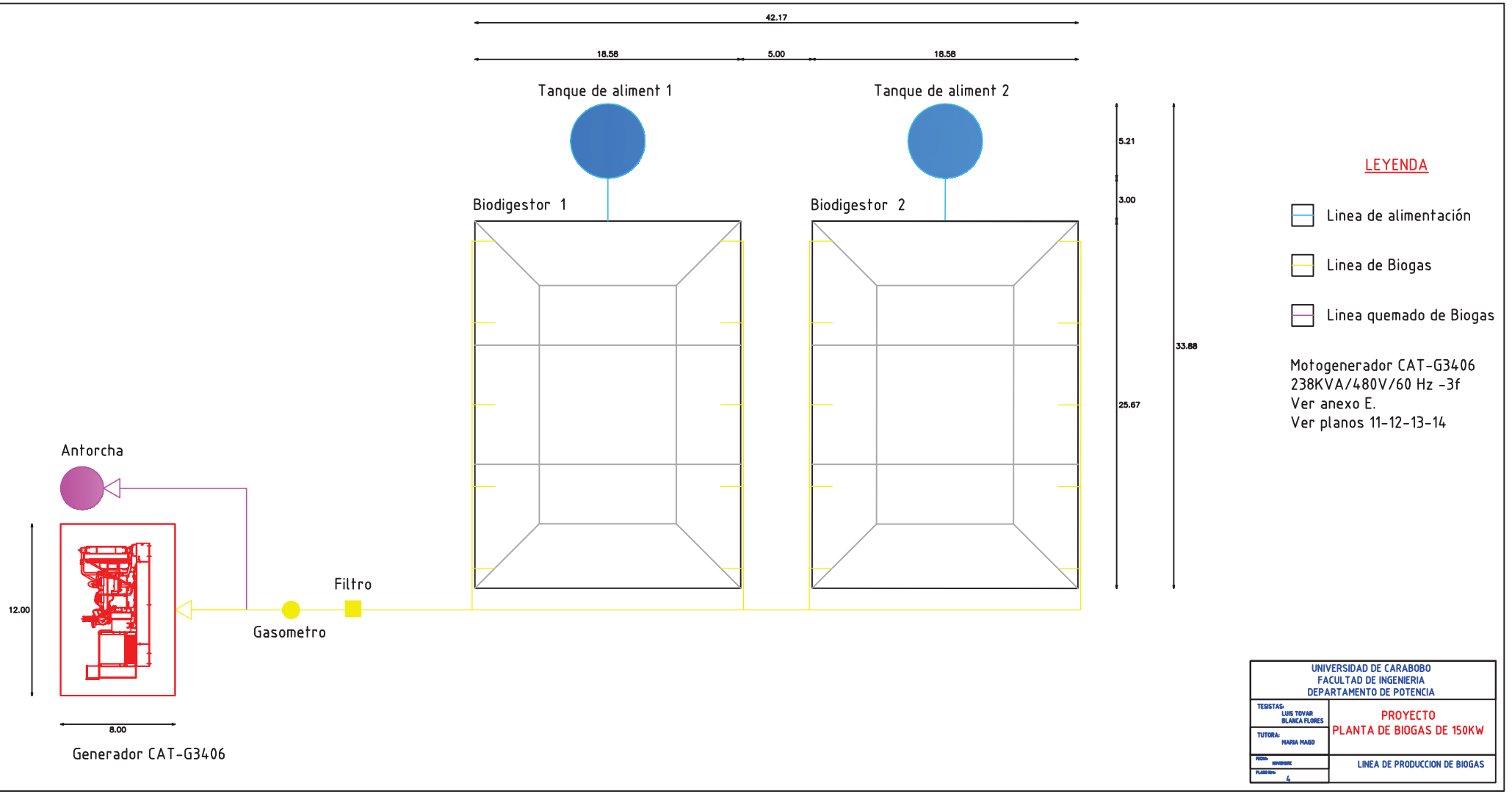
## DISEÑO DE LA PLANTA DE BIOGAS

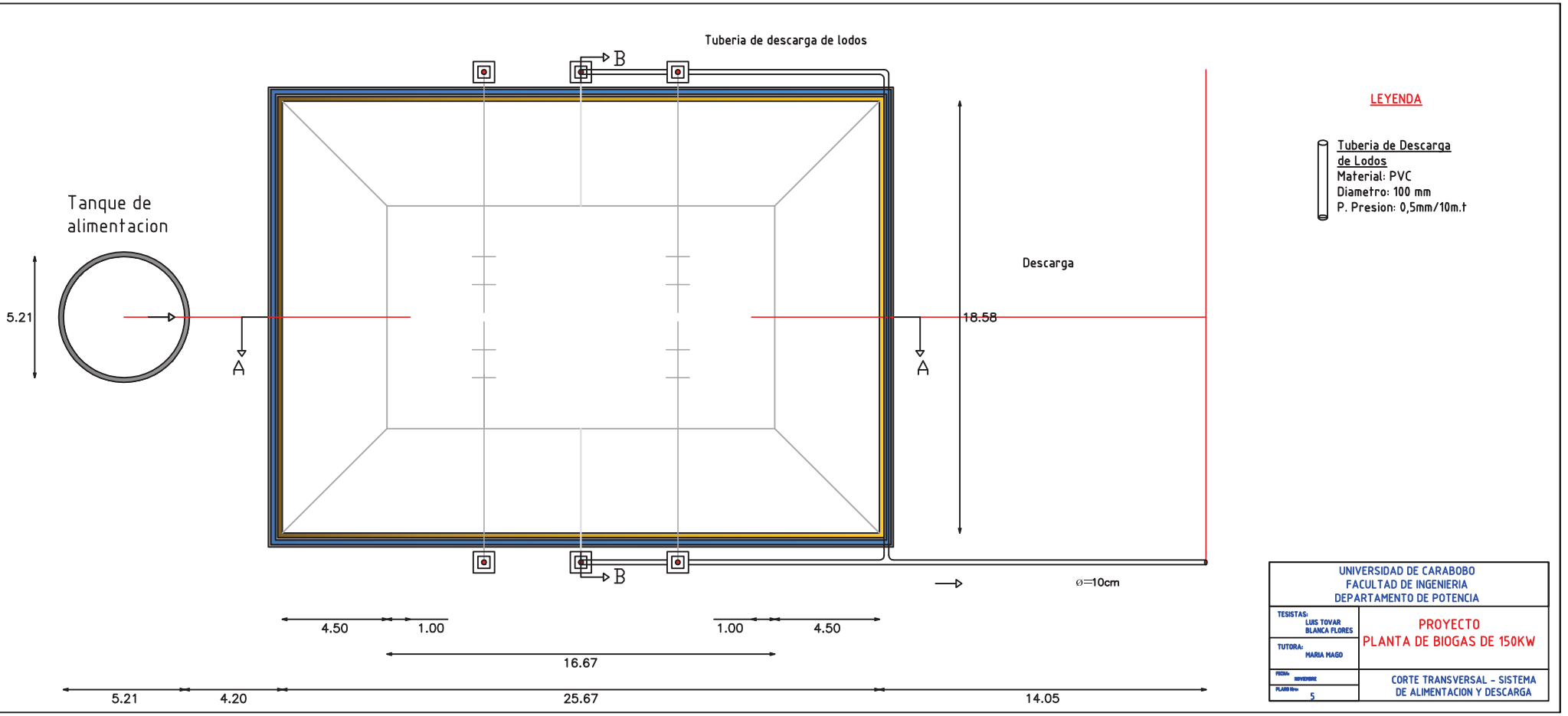
PLANOS


42.17
18.58
5.00
18.58
Tanque de aliment 1
Tanque de aliment 2
Biodigestor 1
Biodigestor 2
5.21
3.00
25.67
33.88
62.53
12.83
15.82
Antorcha
12.00
Filtro
Gasometro
8.00
Generador CAT-G3406
Tanque de descarga
15.82
11.31
Lecho de secado
7.54
10.55
LEYENDA
Linea de alimentación
Linea de Biogas
Linea de Abono agricola
Linea de Efluente
Linea quemado de Biogas
Linea de retorno de lixiviados
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
TESISTAS: LUIS TOVAR
BLANCA FLORES
TUTORA: MARIA MAGD
PROYECTO
PLANTA DE BIOGAS DE 150KW
DISEÑO DE LA PLANTA DE BIOGAS
1


42.17
18.58
5.00
18.58
Tanque de aliment 1
Tanque de aliment 2
Biodigestor 1
Biodigestor 2
5.21
3.00
25.67
33.88
62.53
LEYENDA
Linea de alimentación
Linea de Abono agricola
Linea de retorno de lixiviados
Lecho de secado
15.82
10.55
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
TESISTAS:
LUIS TOVAR
BLANCA FLORES
TUTORA:
MARIA MAGO
PROYECTO
PLANTA DE BIOGAS DE 150KW
LINEA DE PRODUCCION DE BIABONO
2


42.17
18.58
5.00
18.58
Tanque de aliment 1
Tanque de aliment 2
Biodigestor 1
Biodigestor 2
5.21
3.00
25.67
33.88
12.83
11.31
Tanque de descarga
11.31
7.54
LEYENDA
Linea de alimentación
Linea de Efluente
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
TESISTAS:
LUIS TOVAR
BLANCA FLORES
TUTORA:
MARIA MAGO
PROYECTO
PLANTA DE BIOGAS DE 150KW
LINEA DE PRODUCCION DE BIOL
3

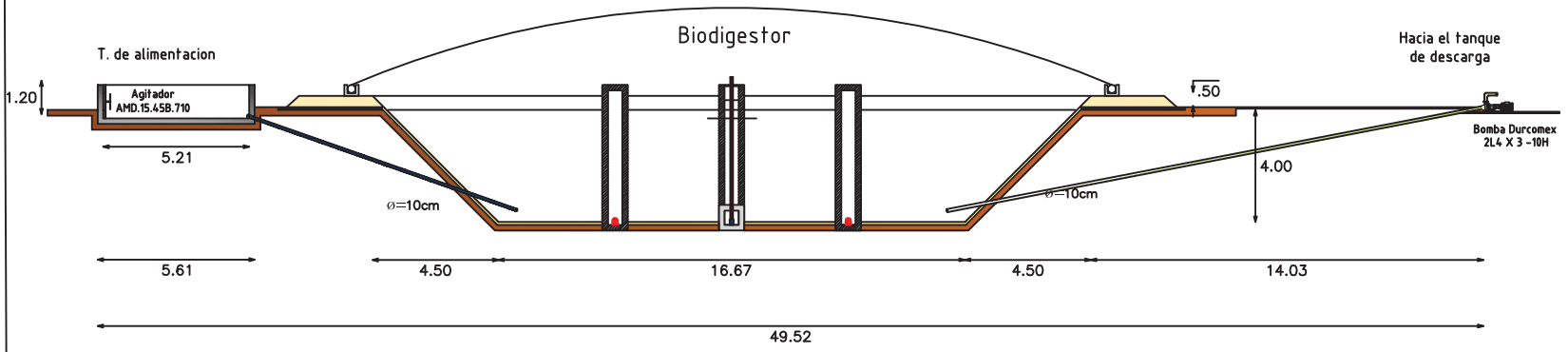

42.17
18.58
5.00
18.58
Tanque de aliment 1
Tanque de aliment 2
Biodigestor 1
Biodigestor 2
5.21
3.00
25.67
33.88
Antorcha
12.00
Filtro
Gasometro
8.00
Generador CAT-G3406
LEYENDA
Linea de alimentación
Linea de Biogas
Linea quemado de Biogas
Motogenerador CAT-G3406
238KVA/480V/60 Hz -3f
Ver anexo E.
Ver planos 11-12-13-14
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
TESISTAS:
LUIS TOVAR
BLANCA FLORES
TUTORA:
MARIA MAGO
PROYECTO
PLANTA DE BIOGAS DE 150KW
LINEA DE PRODUCCION DE BIOGAS
4




LEYENDA

Tuberia de Descarga de Lodos
Material: PVC
Diametro: 100 mm
P. Presion: 0,5mm/10m.t

| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD DE CARABOBO<br>FACULTAD DE INGENIERIA<br>DEPARTAMENTO DE POTENCIA | |
| TESISTAS: LUIS TOVAR<br>BLANCA FLORES | PROYECTO<br>PLANTA DE BIOGAS DE 150KW |
| TUTORA: MARIA MAGO | |
| FECHA: NOVIEMBRE | CORTE TRANSVERSAL - SISTEMA<br>DE ALIMENTACION Y DESCARGA |
| PLANO Nro: 5 | |




## LEYENDA

**Tuberia de Alimentacion**
Material: PVC
Diametro: 100 mm
P. Presion: 0,5mm/10m.t

**Tuberia de descarga de biol**
Material: PVC
Diametro: 100 mm
P. Presion: 0,5mm/10m.t

**Agitador AMD.15.45B.710**
Tension: 3x 480V
Potencia: 0,15 Kw
Frecuencia: 60z
RPM: 1800
Temperatura: Hasta 130°C
Ver anexo A

**Bomba 2L4 X 3 -10H Durcomex**
Tension: 240V
Potencia: 1,5 Kw
Frecuencia: 60z
RPM:1150
Caudal: 60m³/h
Ver anexo C

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA

TESISTAS: LUIS TOVAR
BLANCA FLORES

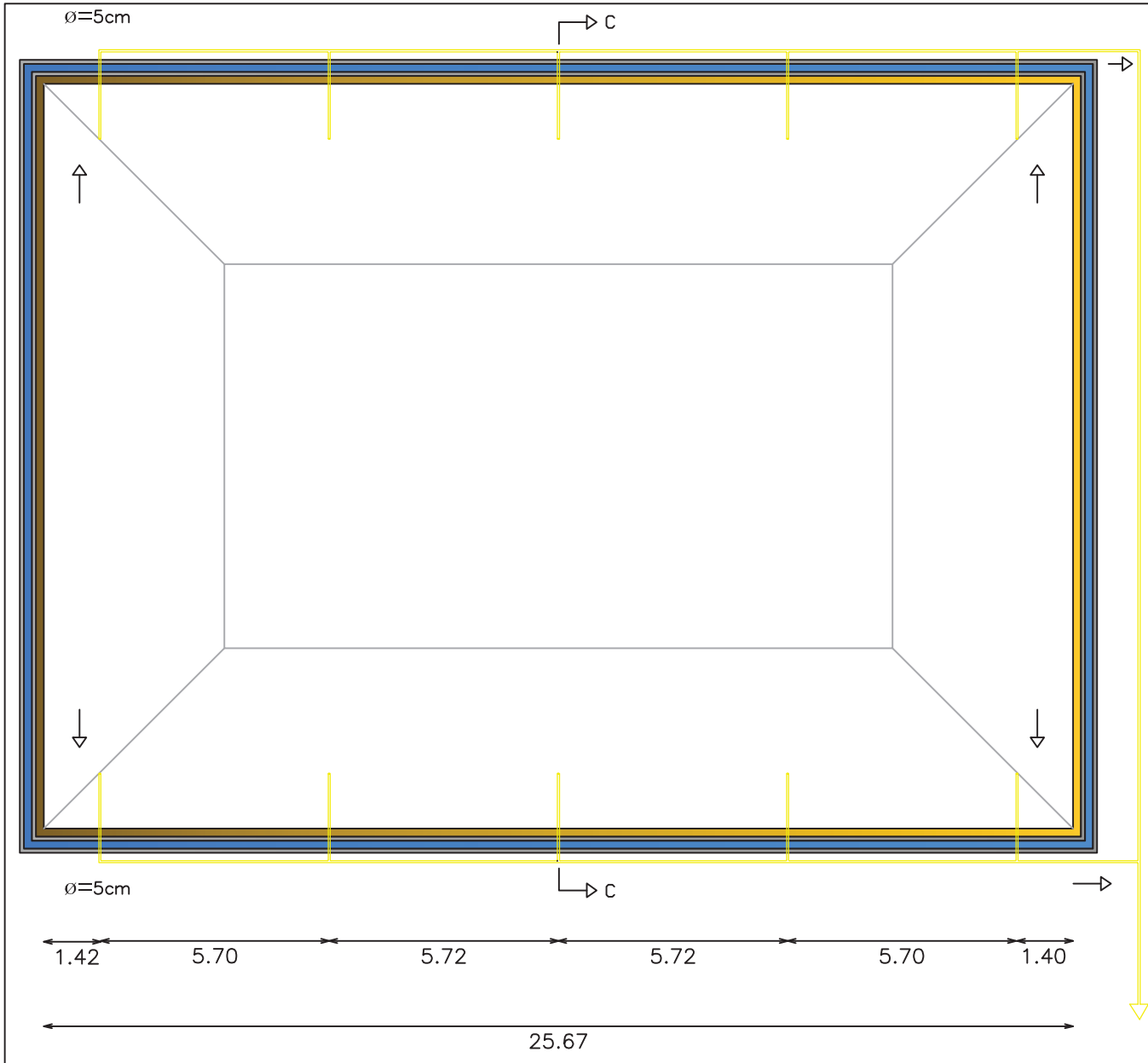
TUTORA: MARIA MAGO

FECHA: NOVIEMBRE

PLANO Nro: 6

PROYECTO
PLANTA DE BIOGAS DE 150KW

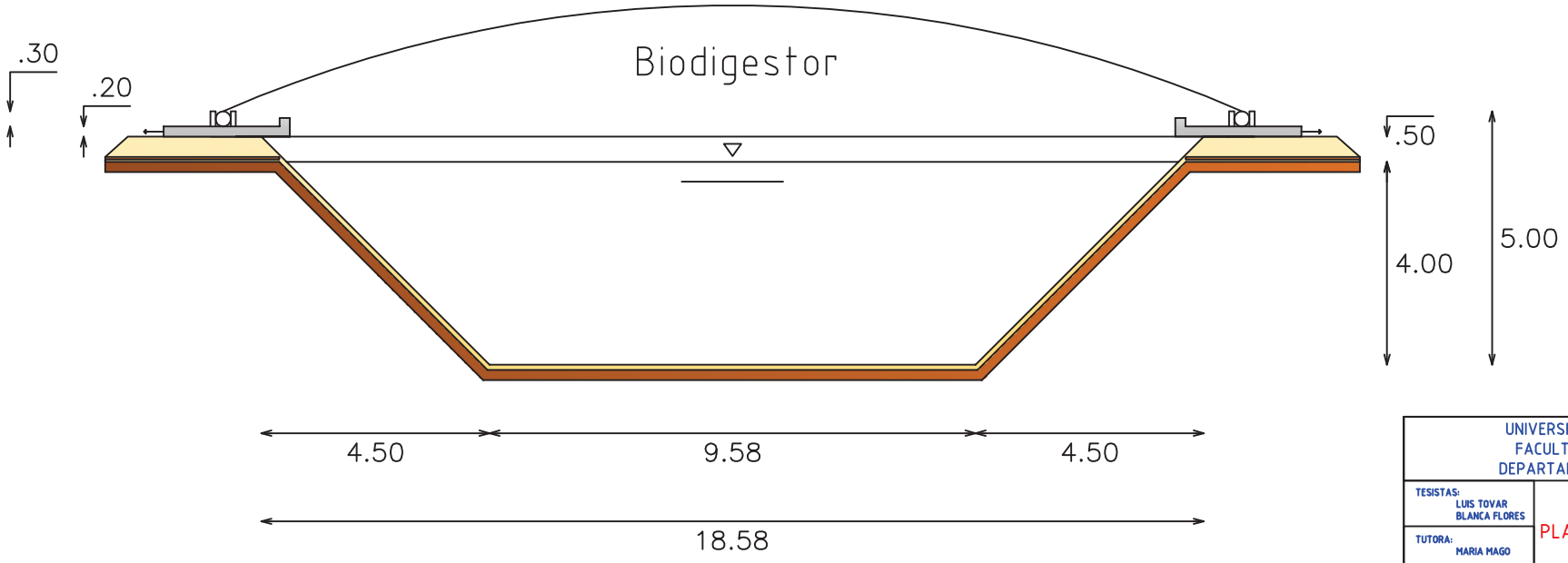
CORTE LONGITUDINAL - SISTEMA
DE ALIMENTACION Y DESCARGA



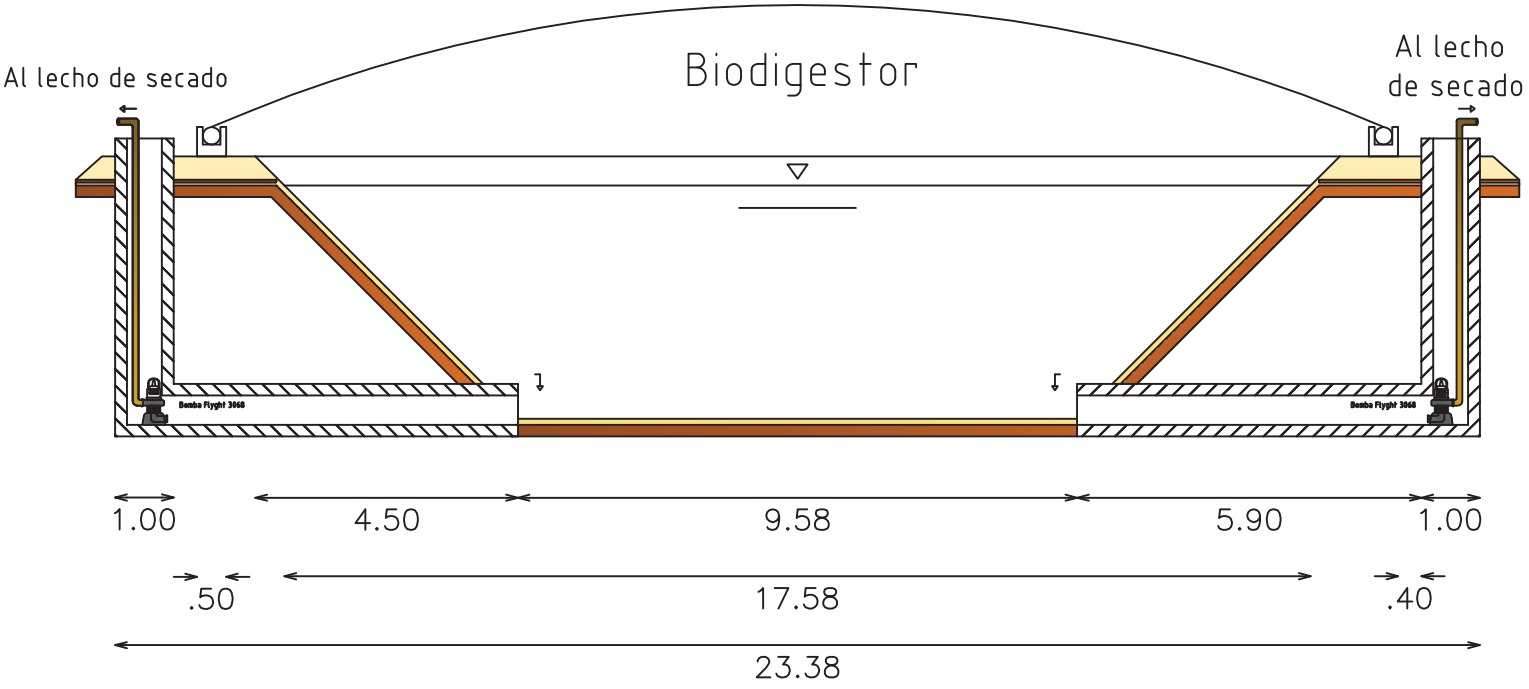

LEYENDA

Tuberia de descarga Biogas
Material: PVC
Diametro: 50 mm
P. Presion: 0,3mm/10m.t

| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD DE CARABOBO<br>FACULTAD DE INGENIERIA<br>DEPARTAMENTO DE POTENCIA | |
| TESISTAS:<br>LUIS TOVAR<br>BLANCA FLORES | PROYECTO<br>PLANTA DE BIOGAS DE 150KW |
| TUTORA:<br>MARIA MAGO | |
| FECHA:<br>NOVIEMBRE | CORTE TRASVERSAL - SISTEMA<br>DE CAPTACION DE BIOGAS |
| PLANO Nro:<br>7 | |




| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD DE CARABOBO<br>FACULTAD DE INGENIERIA<br>DEPARTAMENTO DE POTENCIA | |
| TESISTAS:<br>LUIS TOVAR<br>BLANCA FLORES | PROYECTO<br>PLANTA DE BIOGAS DE 150KW |
| TUTORA:<br>MARIA MAGO | |
| FECHA:<br>NOVIEMBRE | CORTE LONGITUDINAL - SISTEMA<br>DE CAPTACION DE BIOGAS |
| PLANO Nro:<br>8 | |

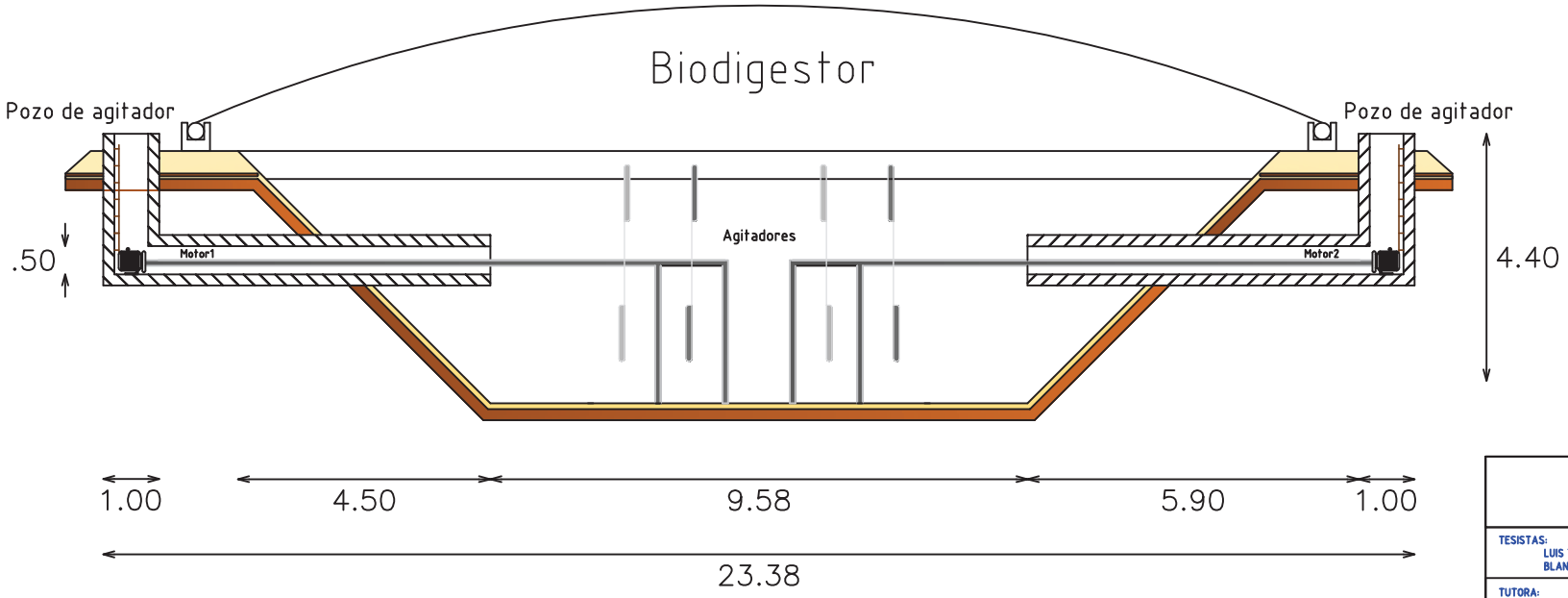



## LEYENDA

**Tuberia de Alimentacion**
Material: PVC
Diametro: 100 mm
P. Presion: 0,5mm/10m.t

**Bomba Flyght 3068**
Tension: 480V
Potencia: 2,3 Kw
Frecuencia: 60z
RPM:1800
Caudal: 18m³/h
Ver anexo D

| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD DE CARABOBO<br>FACULTAD DE INGENIERIA<br>DEPARTAMENTO DE POTENCIA | |
| TESISTAS:<br>LUIS TOVAR<br>BLANCA FLORES | PROYECTO<br>PLANTA DE BIOGAS DE 150KW |
| TUTORA:<br>MARIA MAGO | |
| FECHA:<br>NOVIEMBRE | CORTE LONGITUDINAL - SISTEMA<br>DE DESCARGA DE LODOS |
| PLANO Nro:<br>9 | |

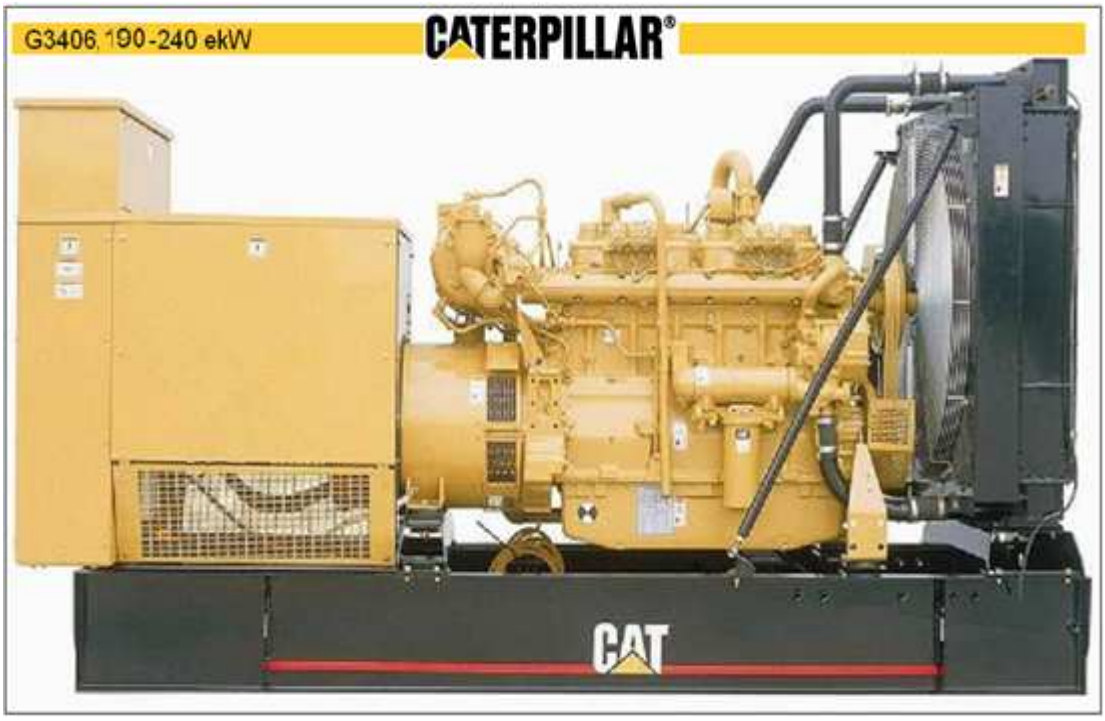



| UNIVERSIDAD DE CARABOBO<br>FACULTAD DE INGENIERIA<br>DEPARTAMENTO DE POTENCIA | |
|---|---|
| TESISTAS:<br>LUIS TOVAR<br>BLANCA FLORES | PROYECTO<br>PLANTA DE BIOGAS DE 150KW |
| TUTORA:<br>MARIA MAGO | |
| FECHA:<br>NOVIEMBRE | CORTE LONGITUDINAL - SISTEMA<br>DE AGITACION DE LA BIOMASA |
| PLANO Nro:<br>10 | |

# ANEXOS

## MOTOR-GENERADOR

**CARATERISTICAS ELECTRICAS**




**Anexo 11: Motogenerador Caterpillar G3406**

Ring Power CAT

CATERPILLAR G3406-SITA Biogas or Natural Gas Package Generator Set

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Open Skid-Mounted | ✓ | Enclosed | | Type | | Sound Attenuated | | | | | |
| | 60 Hz | | | | | | | | | | |
| kVA | 238 | Engine | CATERPILLAR G3406-SITA - Gas | | | | | | | | |
| kW | 190 | Diesel | | HFO | ✓ | Gas | | Bi-Fuel | | Dual-F | |
| Voltage | 480 | Other | RATED CONTINUOUS DUTY - Low Pressure Gas Arrangement | | | | | | | | |
| RPM | 1800 | Turbo | ✓ | Alternator | ✓ | Governor | ✓ | Type | Electrical | | |
| Phase | 3 | Batt.Char. | | JW Heater | | Air Filter | ✓ | Type | Standard | | |
| P.F. | 0.8 | Oil Filter | ✓ | Fuel Filter | | Other | Altronic Ingnition System | | | | |
| Generator | CATERPILLAR SR4 Frame 447 Generator | | | | | Terminal Box | ✓ | Two Bearing: | | | |
| V-Reg. | ✓ | Control Panel | CATERPILLAR Premium Junction Box, Engine Gauges | | | | | | | | |
| Automatic Start-Stop Function | ✓ | Safety Shutdowns | ✓ | Engine Control | ✓ | Digital P. | | Analog P. | ✓ | | |
| Radiator Cooling System | | Attached | | Remote | | H.E. Cooling System Config. | ✓ | H.E. Incl. | | | |
| Fuel Tank | | Capacity | | Type of Fuel Tank | | | | | | | |
| Stock # / Serial Number | 4FD01224 | Model Year | 1996 | Made In | United States | | | | | | |
| Hours | 2 Test Hrs. | Verified | ✓ | Load Tested | ✓ | CATERPILLAR Certified Load Test by RING POWER | ✓ | | | | |

**Anexo 12: Placa de presentación del motogenerador Caterpillar G3406**

## TECHNICAL DATA

| Open Generator Set — 1800 rpm/60 Hz/480 Volts | | | Standby DM5439 | | Continuous DM5440 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Package Performance** | | | | | | |
| Power rating | ekW | | 240 | | 190 | |
| Power rating @ 0.8 PF | kVA | | 300 | | 238 | |
| Aftercooler temperature | Deg C | Deg F | 54 | 130 | 54 | 130 |
| **Fuel Consumption** | | | | | | |
| 100% load with fan | N•m³/hr | scf/hr | 77 | 2894 | 64 | 2398 |
| 75% load with fan | N•m³/hr | scf/hr | 61 | 2291 | 51 | 1912 |
| 50% load with fan | N•m³/hr | scf/hr | 45 | 1682 | 37 | 1418 |
| **Cooling System** | | | | | | |
| Ambient air temperature* | Deg C | Deg F | 40 | 105 | 40 | 105 |
| Air flow restriction (system) | kPa | in water | 0.12 | 0.5 | 0.12 | 0.5 |
| Air flow (maximum @ rated speed for standard radiator arrangement) | m³/min | cfm | 679 | 23,983 | 836 | 29,524 |
| Engine coolant capacity with radiator | L | Gal | 57 | 15 | 57 | 15 |
| Jacket water outlet temperature | Deg C | Deg F | 99 | 210 | 99 | 210 |
| **Exhaust System** | | | | | | |
| Combustion air inlet flow rate | N•m³/min | scfm | 16 | 572 | 12 | 466 |
| Exhaust gas stack temperature | Deg C | Deg F | 536 | 997 | 525 | 977 |
| Exhaust gas flow rate | N•m³/min | cfm | 16 | 1749 | 13 | 1424 |
| Exhaust flange size (internal diameter) | mm | in | 127 | 5 | 127 | 5 |
| Exhaust system backpressure (maximum allowable) | kPa | in water | 6.7 | 27 | 6.7 | 27 |
| **Heat Rejection** | | | | | | |
| Low Heat Value (LHV) fuel input | kW | Btu/min | 780 | 44,358 | 647 | 36,767 |
| Heat rejection to jacket water (includes oil cooler) | kW | Btu/min | 234 | 13,305 | 210 | 11,946 |
| Total heat rejection to exhaust (LHV to 25° C) | kW | Btu/min | 217 | 12,319 | 174 | 9892 |
| Heat rejection to exhaust (LHV to 120° C) | kW | Btu/min | 167 | 8180 | 132 | 5460 |
| Heat rejection to A/C | kW | Btu/min | 25 | 1395 | 12 | 694 |
| Heat rejection to atmosphere from engine | kW | Btu/min | 31 | 1774 | 26 | 1471 |
| Heat rejection to atmosphere from generator | kW | Btu/min | 20 | 1162 | 16 | 897 |
| **Generator** | | | | | | |
| Motor starting capability @ 30% voltage dip** | kVA | | 649 | | 649 | |
| Frame | | | 447 | | 447 | |
| Temperature rise | Deg C | | 130 | | 105 | |
| **Emissions*** ** | | | | | | |
| NOx | g/bhp-hr | | 17.8 | | 19.7 | |
| CO | g/bhp-hr | | 1.1 | | 1 | |
| HC (total) | g/bhp-hr | | 3.9 | | 4.2 | |
| HC (non-methane) | g/bhp-hr | | 0.59 | | 0.63 | |
| Exhaust $O_2$ (dry) | % | | 4.0 | | 4.0 | |

*Ambient capability at 200 m (660 ft) above sea level. For ambient capability at other altitudes, consult your Caterpillar dealer.

**Assumes synchronous driver

***Emissions data measurement is consistent with those described in EPA CFR 40 PART 89 SUBPART D and ISO 8178-1 for measuring HC, CO, $CO_2$ and NOx. Data shown is based on steady state engine operating conditions of 77° F, 28.43 inches HG and fuel having a LHV of 920 BTU per cubic foot at 30.00 inches HG absolute and 32° F. Not to exceed emission data shown is subject to instrumentation, measurement, facility and engine fuel system adjustments.

**Anexo 13: Datos técnicos del Motogenerador Caterpillar G3406**

**SPECIFICATIONS**

**CAT SR4B GENERATOR**

| | |
|---|---|
| Frame | 447 |
| Type | Self excited, static regulated, brushless |
| Construction | Single bearing, close coupled |
| Three phase | 12 lead reconnectable |
| Insulation | Class H with tropicalization and antiabrasion |
| IP rating | Drip proof 22 |
| Alignment | Pilot shaft |
| Overspeed capability | |
| Prototype tested | 150% |
| Production tested | 125% |
| Wave form | Less than 5% deviation |
| Paralleling capability | Standard |
| Voltage regulator | 3-phasing sensing with Volts-per-Hertz |
| Voltage regulation | Less than ± 1/2% (steady state) |
| | Less than ± 1% (no load to full load) |
| Voltage gain | Automatic |
| Telephone Influence Factor (TIF) | Less than 50 |
| Harmonic Distortion (THD) | Less than 5% |

**Anexo 14: Especificaciones Técnicas del Generador CAT SR4B**

**SPECIFICATIONS**

**CAT ENGINE**

G3406 TA, 4-stroke-cycle

| | |
|---|---|
| Bore – mm (in) | 137 (5.4) |
| Stroke – mm (in) | 164 (6.5) |
| Displacement – L (cu in) | 14.6 (891) |
| Compression ratio | 10.3:1 |
| Aspiration | Turbocharged-Aftercooled |
| Ignition system | Digital ignition |
| Governor type | Woodward Flo-Tech |

**Anexo 15: Especificaciones Técnicas del Motor CAT G3406**

**SPECIFICATIONS**

**CAT CONTROL PANEL**

**24 Volt DC Control**
NEMA 1, IP22 enclosure
Electrically dead front
Lockable hinged door
Generator instruments meet ANSI C-39-1
Terminal box mounted
Single location customer connector point

**Anexo 16: Especificaciones Técnicas del Panel de Control CAT**

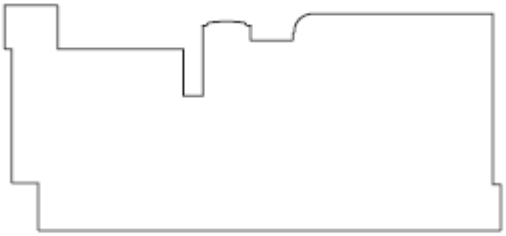
| STANDBY 240 ekW CONTINUOUS 190 ekW 60 Hz | CATERPILLAR | |
|---|---|---|
| System | Standard | Optional |
| Air Inlet | Single element canister type air cleaner<br>Service indicator | |
| Cooling | Radiator with guard<br>Coolant drain lines with valves<br>Fan and belt guards<br>Caterpillar Coolant<br>Low coolant level sensors | Jacket water coolant heater with shutoff valves<br>Radiator removal |
| Exhaust | Stainless steel exhaust flex with weld outlet flange | 15 dBA muffler |
| Fuel | Gas pressure regulator<br>Low pressure fuel system<br>Energize To Run (ETR) gas shutoff valve | |
| Generator | Self excited<br>Class H insulation<br>Class F temperature rise (105° C continuous/130° C standby)<br>VR6 Voltage Regulator, 3-phase sensing, with reactive droop<br>2:1 Volts/Hz or 1:1 Volts/Hz<br>Bus bar termination<br>Extension box | Permanent magnet excited<br>Digital Voltage Regulator<br>Digital Voltage Regulator with KVAR/PF control<br>Anti-condensation space heater<br>Oversize & premium generators<br>Circuit breakers, UL, 3 pole with shunt trip<br>Multiple breaker capability |
| Governor | Flo-Tech 68 speed control | Electronic load sharing |
| Ignition | Digital ignition system | |
| Control Panels | EMCP II | EMCP II+<br>Customer Communication Module<br>Local alarm & remote annunciator modules |
| Lube | Lubricating oil and filter<br>Oil drain line with valve<br>Fumes disposal | Manual sump pump |
| Mounting | Narrow base<br>Linear vibration isolators between base and engine-generator | |
| Starting/Charging | 35 amp charging alternator<br>24 volt starting motor<br>Batteries with rack and cables<br>Battery disconnect switch | Battery chargers, 5 & 10 amp<br>Oversize batteries |
| General | | Automatic Transfer Switches (ATS)<br>Floor standing circuit breakers |

**Anexo 17: Equipos instalados con el Motogenerador y equipos opcionales**

STANDBY 240 ekW CONTINUOUS 190 ekW 60 Hz — CATERPILLAR

STANDBY/CONTINUOUS POWER GENERATOR SET PACKAGE — TOP VIEW

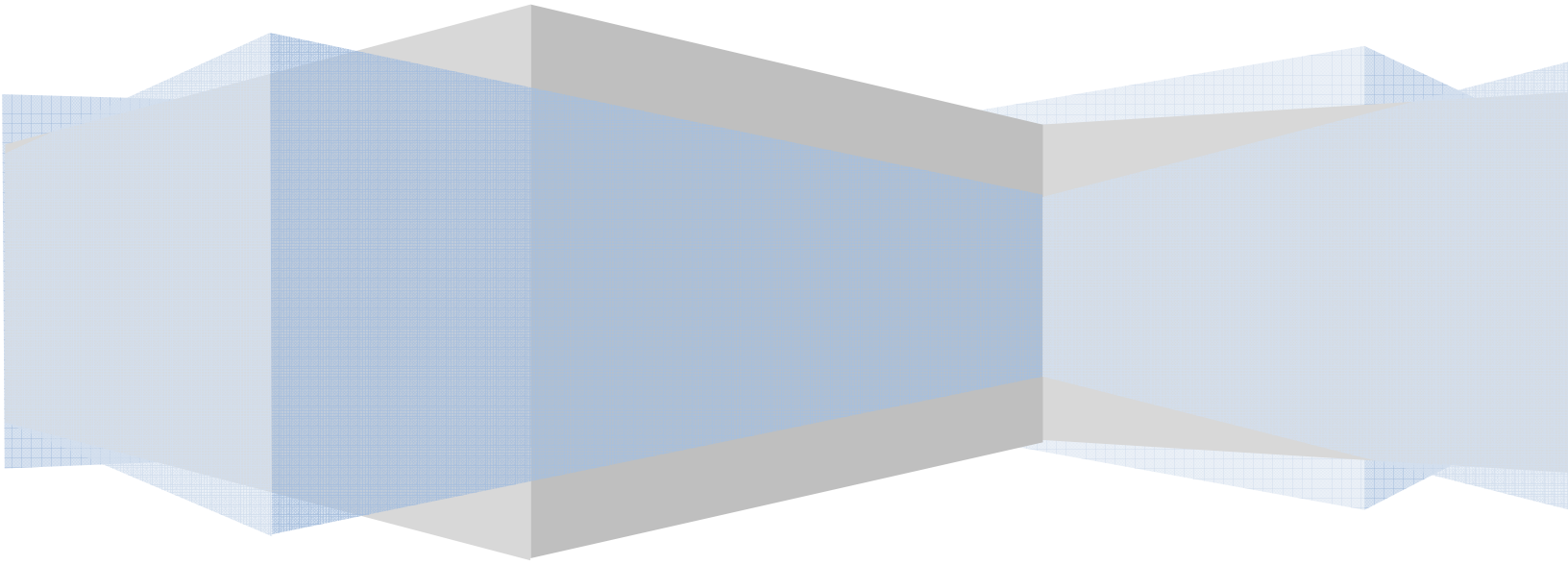
STANDBY/CONTINUOUS POWER GENERATOR SET PACKAGE — SIDE VIEW



| Package Dimensions | | |
|---|---|---|
| Length | 4074 mm | 160.39 in |
| Width | 1398.4 mm | 55.05 in |
| Height | 2138.6 mm | 84.20 in |
| Shipping Weight | 4318 kg | 9500 lb |

**Anexo 18: Dimensiones del Motogenerador CAT SR4B**

# APENDICES



# APENDICES

| PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (ºC) | Peso específico ($kN/m^3$) | Densidad ($kg/m^3$) | Módulo de elasticidad ($kN/m^2$) | Viscosidad dinámica ($N \cdot s/m^2$) | Viscosidad cinemática ($m^2/s$) | Tensión superficial (N/m) | Presión de vapor ($kN/m^2$) |
| 0 | 9,805 | 999,8 | $1,98 \cdot 10^6$ | $1,781 \cdot 10^{-3}$ | $1,785 \cdot 10^{-6}$ | 0,0765 | 0,61 |
| 5 | 9,807 | 1000,0 | $2,05 \cdot 10^6$ | $1,518 \cdot 10^{-3}$ | $1,519 \cdot 10^{-6}$ | 0,0749 | 0,87 |
| 10 | 9,804 | 999,7 | $2,10 \cdot 10^6$ | $1,307 \cdot 10^{-3}$ | $1,306 \cdot 10^{-6}$ | 0,0742 | 1,23 |
| 15 | 9,798 | 999,1 | $2,15 \cdot 10^6$ | $1,139 \cdot 10^{-3}$ | $1,139 \cdot 10^{-6}$ | 0,0735 | 1,70 |
| 20 | 9,789 | 998,2 | $2,17 \cdot 10^6$ | $1,102 \cdot 10^{-3}$ | $1,003 \cdot 10^{-6}$ | 0,0728 | 2,34 |
| 25 | 9,777 | 997,0 | $2,22 \cdot 10^6$ | $0,890 \cdot 10^{-3}$ | $0,893 \cdot 10^{-6}$ | 0,0720 | 3,17 |
| 30 | 9,764 | 995,7 | $2,25 \cdot 10^6$ | $0,708 \cdot 10^{-3}$ | $0,800 \cdot 10^{-6}$ | 0,0712 | 4,24 |
| 40 | 9,730 | 992,2 | $2,28 \cdot 10^6$ | $0,653 \cdot 10^{-3}$ | $0,658 \cdot 10^{-6}$ | 0,0696 | 7,38 |
| 50 | 9,689 | 988,0 | $2,29 \cdot 10^6$ | $0,547 \cdot 10^{-3}$ | $0,553 \cdot 10^{-6}$ | 0,0679 | 12,33 |
| 60 | 9,642 | 983,2 | $2,28 \cdot 10^6$ | $0,466 \cdot 10^{-3}$ | $0,474 \cdot 10^{-6}$ | 0,0662 | 19,92 |
| 70 | 9,589 | 977,8 | $2,25 \cdot 10^6$ | $0,404 \cdot 10^{-3}$ | $0,413 \cdot 10^{-6}$ | 0,0644 | 31,16 |
| 80 | 9,530 | 971,8 | $2,20 \cdot 10^6$ | $0,354 \cdot 10^{-3}$ | $0,364 \cdot 10^{-6}$ | 0,0626 | 47,34 |
| 90 | 9,466 | 965,3 | $2,14 \cdot 10^6$ | $0,315 \cdot 10^{-3}$ | $0,326 \cdot 10^{-6}$ | 0,0608 | 70,10 |
| 100 | 9,399 | 958,4 | $2,07 \cdot 10^6$ | $0,282 \cdot 10^{-3}$ | $0,294 \cdot 10^{-6}$ | 0,0589 | 101,33 |

## TENSIÓN DEL VAPOR Y PESO ESPECÍFICO DEL AGUA SEGÚN TEMPERATURAS

| t °C | $T_v$ Kg/cm² | $\gamma$ Kg/dm³ | t °C | $T_v$ Kg/cm² | $\gamma$ Kg/dm³ | t °C | $T_v$ Kg/cm² | $\gamma$ Kg/dm³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,0062 | 0.9998 | 84 | 0.5667 | 0.9693 | 135 | 3.192 | 0.9305 |
| 5 | 0,0089 | 1.0000 | 86 | 0.6129 | 0.9680 | 140 | 3.685 | 0.9260 |
| 10 | 0,0125 | 0.9996 | 88 | 0.6623 | 0.9667 | 145 | 4.237 | 0.9216 |
| 15 | 0.0174 | 0.9990 | 90 | 0.7149 | 0.9653 | 150 | 4.854 | 0.9169 |
| 20 | 0.1238 | 0.9982 | 92 | 0.7710 | 0.9640 | 155 | 5.540 | 0.9121 |
| 25 | 0.0323 | 0.9970 | 94 | 0.8307 | 0.9625 | 160 | 6.302 | 0.9073 |
| 30 | 0.0432 | 0.9955 | 96 | 0.8942 | 0.9611 | 165 | 7.146 | 0.9023 |
| 35 | 0.0573 | 0.9939 | 98 | 0.9616 | 0.9596 | 170 | 8.076 | 0.8973 |
| 40 | 0.0752 | 0.9921 | 100 | 1.0332 | 0.9583 | 175 | 9.101 | 0.8920 |
| 45 | 0.0977 | 0.9900 | 102 | 1.1092 | 0.9568 | 180 | 10.225 | 0.8867 |
| 50 | 0.1258 | 0.9880 | 104 | 1.1898 | 0.9554 | 185 | 11.456 | 0.8814 |
| 55 | 0.1605 | 0.9857 | 106 | 1.2751 | 0.9540 | 190 | 12.800 | 0.8760 |
| 60 | 0.2031 | 0.9831 | 108 | 1.3654 | 0.9525 | 195 | 14.265 | 0.8703 |
| 62 | 0.2207 | 0.9821 | 110 | 1.4609 | 0.9510 | 200 | 15.857 | 0.8646 |
| 64 | 0.2438 | 0.9810 | 112 | 1.5618 | 0.9495 | 205 | 17.585 | 0.8587 |
| 66 | 0.2666 | 0.9800 | 114 | 1.6684 | 0.9479 | 210 | 19.465 | 0.8528 |
| 68 | 0.2912 | 0.9788 | 116 | 1.7809 | 0.9464 | 215 | 21.477 | 0.8465 |
| 70 | 0.3177 | 0.9777 | 118 | 1.8995 | 0.9448 | 220 | 23.659 | 0.8403 |
| 72 | 0.3463 | 0.9765 | 120 | 2.0245 | 0.9431 | 225 | 26.007 | 0.8339 |
| 74 | 0.3769 | 0.9754 | 122 | 2.1561 | 0.9414 | 230 | 28.531 | 0.8272 |
| 76 | 0.4098 | 0.9742 | 124 | 2.2947 | 0.9398 | 235 | 31.239 | 0.8206 |
| 78 | 0.4451 | 0.9730 | 126 | 2.4404 | 0.9381 | 240 | 34.140 | 0.8136 |
| 80 | 0.4829 | 0.9718 | 128 | 2.5935 | 0.9365 | 245 | 37.244 | 0.8264 |
| 82 | 0.5234 | 0.9705 | 130 | 2.7544 | 0.9348 | 250 | 40.560 | 0.7992 |

## PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

| ALTIDUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR | PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN m. |
|---|---|
| 0 | 10,33 |
| 200 | 10,080 |
| 400 | 9,830 |
| 600 | 9,580 |
| 800 | 9,340 |
| 1.000 | 9,110 |
| 1.200 | 8,890 |
| 1.400 | 8,670 |
| 1.600 | 8,450 |
| 1.800 | 8,240 |
| 2.000 | 8,040 |
| 2.500 | 7,560 |
| 3.000 | 7,100 |
| 3.500 | 6,680 |
| 4.000 | 6,270 |